1 р. 25 к. — 1.

5084 б

А. КИСЕЛЕВ

ЭЛЕМЕНТЫ АЛГЕБРЫ И АНАЛИЗА

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ЭЛЕМЕНТЫ АЛГЕБРЫ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
1930

А. КИСЕЛЕВ

ЭЛЕМЕНТЫ АЛГЕБРЫ И АНАЛИЗА

★

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ЭЛЕМЕНТЫ АЛГЕБРЫ

С ПРИЛОЖЕНИЕМ ЧЕТЫРЕХЗНАЧНЫХ ТАБЛИЦ
КВАДРАТНЫХ КОРНЕЙ, ЛОГАРИФМОВ И АНТИЛОГАРИФМОВ

ИЗДАНИЕ ШЕСТОЕ

Допущено Научно-педагогической секцией
Государственного ученого совета

91 — 125 тысяча

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА — 1928 — ЛЕНИНГРАД

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ.

Предлагаемая книга „Элементы алгебры и анализа“ значительно разнится от моей „Элементарной алгебры“, переизданной в переработанном виде в 1923 году.

Различие это троякого рода:

во-первых, весь материал заново переработан с целью, главным образом, его упрощения и лучшего распределения;

во-вторых, настоящая книга содержит в себе элементы анализа бесконечно-малых, с его применениями к вопросам элементарной геометрии и начальной механики, и краткие сведения по аналитической геометрии, без которых элементарный курс математики был бы неполным;

в-третьих, в конце книги помещены некоторые дополнения к обычному курсу алгебры, напр. теория соединений, бином Ньютона, однозначность первых четырех алгебраических действий и другие.

Укажу сначала главнейшие изменения первого рода, причем буду держаться той последовательности, в какой материал распределен в предлагаемой книге.

Изложение относительных чисел по возможности упрощено и поставлено раньше понятия об уравнении, чтобы при решении уравнений иметь возможность не стесняться невозможностью вычитания.

Изложение так называемых „алгебраических действий“ (тождественных преобразований) проведено теперь более индуктивным путем, чем прежде, и местами сокращено.

Глава „Алгебраические дроби“ значительно упрощена (напр. § 77—основное свойство дроби, § 83—умножение дробей, и др).

Равным образом упрощено изложение отношений и пропорций; все оно ведется теперь ближе к арифметическим понятиям.

В главе этой сделано небольшое добавление о производных пропорциях (§ 98), с которыми приходится иметь дело в геометрии, а также указано геометрическое применение свойства равных отношений (к установлению пропорциональности между периметрами и сходственными сторонами подобных многоугольников).

В §§ 103 и 105 выражение формулой пропорциональности (прямой и обратной) сделано более конкретно, чем прежде.

Подробнее изложено о графике двучлена первой степени и о графическом решении уравнения.

Обстоятельнее развито понятие о равносильности уравнений, получаемых из данного уравнения посредством прибавления к его частям одного и того же числа или посредством умножения частей на одно и то же число (§§ 120—124).

Добавлено графическое истолкование некоторых случаев решения уравнения $ax=b$ (§ 133). Добавлен параграф (134) о буквенных уравнениях.

С целью лучшего уяснения процесса извлечения корня предварительно указано сокращенное возвышение в квадрат целого числа (§ 157).

Значительно упрощено объяснение извлечения квадратного корня из чисел. Теперь все изложение ведется чисто арифметическим путем, без посредства уравнения с 2 неизвестными, как это делалось в моей прежней алгебре, и без предварительного установления свойства числа десятков корня и свойства числа его единиц. Для нахождения приближенных квадратных корней дано более практичное правило (§ 177).

В конце книги приложены таблицы квадратных корней четырехзначных чисел как целых, так и дробных; объяснение их помещено в тексте книги (§ 178). Таблицы эти взяты мною из известного английского учебника: „Elementary algebra by Godfrey and Siddons (1924 г.). Они значительно сокращают время и труд при вычислениях и служат хорошим пособием при разъяснении некоторых статей алгебры (напр., при построении графика показательной функции $y=10^x$ при помощи частных значений этой функции при $x={}^1/_2$, ${}^1/_4$, ${}^1/_8$, ${}^1/_{16}$ и т. д. (§ 263).

В главе о приближенных вычислениях, помимо более конкретного изложения, добавлены еще правила сокращенного умножения и сокращенного деления, позволяющие сравнительно быстро находить приближенное произведение и частное с желаемой степенью точности.

Целая функция 2-й степени и ее графическое изображение рассмотрены в предлагаемой книге значительно подробнее, чем прежде (§§ 220—228).

При изложении свойств функции $y=x^2$, $y=x^3$ и других (показательной, логарифмической и пр.) прежде всего решаются вопросы о возможности функции, об ее однозначности или многозначности и (до некоторой степени) об ее непрерывности, и только после разрешения этих вопросов указывается построение их графиков по таблице частных значений.

Вместо обратной функции $y=\sqrt[3]{x}$ рассматривается более простая функция $y=\sqrt{x}$, на которой впервые для читателя обнаруживается свойство многозначности. При этом наглядно устанавливается соотношение между графиком прямой функции и графиком ей обратной (§ 182); соотношение это в дальнейшем позволяет быстро и легко найти график логарифмической функции по графику показательной и вообще график обратной функции по графику прямой.

При решении иррациональных уравнений более наглядно, чем прежде, разъясняется причина появления посторонних решений (§ 231).

Свойства бесконечных прогрессий, а также первое понятие о пределе изложены в этой книге более просто, чем прежде (§§ 250—254).

Сокращено и лишено абстрактности изложение показателей отрицательных и дробных (§§ 256—261).

Добавлена глава о некоторых свойствах степени с рациональными показателями для лучшего усвоения свойств показательной и логарифмической функции (§ 262).

Для лучшей иллюстрации свойств десятичных логарифмов к графикам функций $y=2^x$ и $y=(^1/_2)^x$ (и им обратных) добавлены еще графики функций $y=10^x$ и $y=\log_{10}x$ (черт. 61 и 62).

С целью упрощения весь отдел о логарифмах переделан заново.

Описание таблиц пятизначных логарифмов заменено описанием таблиц четырехзначных, пользование которыми значительно проще и которые тем не менее вполне достаточны для практических целей вычисления.

В конце книги приложены и самые таблицы четырехзначных логарифмов и антилогарифмов.

Таким образом, изменения, внесенные теперь в изложение прежнего алгебраического материала, имеют целью главным образом отвлеченность заменить конкретностью, дедуктивны выводы иллюстрировать индуктивно и тем самым облегчать читателю усвоение учебного материала.

Переходя теперь к тем отделам этой книги, которые можн назвать новыми (элементы анализа и аналитической геометрии сравнительно с прежним материалом алгебры, надо прежд всего заметить, что содержание этих отделов (а также и элементов алгебры) находится в соответствии с появившимис в 1925 году программами-минимум единой трудово школы, изданными Научно-методическим совето Ленинградского губоно.

Статьи эти следующие:

1. Основные свойства пределов и применение и к вопросам элементарной геометрии (определение длины окружности, площади круга, боковых поверхностей цилиндра и конуса, объемов пирамиды, цилиндра, конуса и шара).

2. Начальные сведения о производных функциях и их применение к алгебраическому анализу (признак возрастания и убывания функций, нахождение maximum и minimum, определение вогнутости и выпуклости кривых, исследование целых функций 2-й и 3-й степеней и пр.) и к вопроса элементарной механики (нахождение скорости по данному закону пространства и нахождение ускорения по данному закон скорости, с иллюстрацией этих применений примерами свободного падения тел и движения тела, брошенного вертикальн вверх).

3. Элементарные сведения по аналитической геометрии (уравнения прямой, окружности, эллипса, гипербол и параболы) с указанием главнейших свойств кривых 2-го порядка.

4. Понятие о первообразной функции и ее применения в геометрии (нахождение объемов пирамиды, конус шарового сегмента) и в механике (нахождение пространства п данной скорости и скорости по данному ускорению).

Изложение всех этих статей я стремился выполнить возможно конкретнее и нагляднее, при посредстве большого количеств чертежей (число их в книге равно 119). При этом пособиями мн между прочим, служили:

C. Godfrey and A. W. Siddons. Elementary algebra (1924)
W. E. Paterson. School algebra (1924).

S. Bernard and J. M. Child. A new algebra.

Charles Davison. Highor algebra for colleges.

Dr. Josef Jacob. *Arithmetik (1921).*

Prof. Dr. G. Ulrich. Ausführlisches Lehrbuch für den Selbstunterricht (1922).

Prof. Dr. Chr. Schmehl. Die Algebra und algebraische Analysis.

Behrendsen-Götting. Lehrbuch der Mathematik nach modernen Grundsätzen.

Richard Sappantschisch. Lehrbuch der Arithmetik und Algebra.

И другие.

В приложении я поместил еще краткое изложение теории *соединений и бинома* Ньютона и некоторые другие дополнительные статьи, полезные для тех лиц, которые желают углубить и расширить свои сведения по элементарной математике.

Впоследствии я намерен дополнить мои „Элементы“ еще и систематически подобранными упражнениями и задачами.

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЯТОМУ ИЗДАНИЮ.

Пятое издание подразделено на 2 части. К первой части отнесены „Элементы алгебры“ с приложением четырехзначных таблиц квадратных корней, логарифмов и антилогарифмов; ко второй — „Элементы анализа“ вместе с некоторыми дополнительными статьями по алгебре.

Сверх того в пятом издании книги введены следующие изменения и дополнения:

1. Сделаны многочисленные исправления и улучшения; напр., в § 109 (часть первая) добавлено (мелким шрифтом) обобщение и уточнение доказательства того, что график прямой пропорциональной зависимости есть прямая линия; в § 320 (часть 2-я) улучшено разъяснение недостаточности определения касательной, как такой прямой, которая с кривою имеет только одну бщую точку, и многие другие.

2. Решение неравенства второй степени (с одним неизвестым), помещавшееся в предыдущих изданиях в „добавлениях“ в конце книги), перенесено теперь в главу о трехчлене второй тепени (часть 1-я, § 228,2), где оно является более уместным.

3. Равным образом. „Соединения“ и „Бином Ньютона“, помещавшиеся в „добавлениях“, отнесены теперь к „Элементам алгебры“ и помещены в конце первой части.

4. Совершенно переработано доказательство свойства касательной (что она есть биссектриса угла, образованного...) к эллипсу, к гиперболе и к параболе (часть вторая, §§ 360, 365 и 369). В настоящем издании это доказательство исходит непосредственно из общего определения касательной как предельного положения секущей, тогда как в предыдущих изданиях доказательство основывалось на неверном допущении, что прямая, имеющая с кривой только одну общую точку, есть касательная к этой кривой.

5. Из добавлений теперь выпущена имеющая только теоретическое значение глава: „Освобождение уравнения от знаков радикала помощью неопределенных коэффициентов“. Она заменена теперь более важными для курса алгебры главами: „Общие формулы решения системы двух уравнений первой степени“ (часть 2-я, § 396 и след.), „Понятие о комплексных числах“ (§ 400 и след.) и другими.

6. К настоящему изданию изготовлены мною многочисленные упражнения и задачи, расположенные сообразно порядку следования параграфов текста книги. Упражнения к „Элементам алгебры“, ввиду их значительного объема (более 1200 №№) выделены в особую книжку под названием: Упражнения и задачи к „Элементам алгебры“. Упражнения же к „Элементам анализа“ помещены в конце второй части.

ОТДЕЛ ПЕРВЫЙ.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ПОНЯТИЯ.

Глава первая.

Алгебраическое знакоположение.

1. Употребление букв. а) Для выражения общих свойств чисел. Пусть мы желаем кратко выразить на письме, что произведение двух чисел не изменится, если мы поменяем местами множимое со множителем. Тогда, обозначив одно число буквой a, а другое буквой b, мы можем написать равенство:

$$a \times b = b \times a,$$

или короче: $ab = ba$, условившись раз навсегда, что если между двумя буквами, написанными рядом, не стоит никакого знака, то это значит, что между ними подразумевается знак умножения.

Так поступают всегда, если желают выразить, что некоторое свойство принадлежит не каким-нибудь отдельным числам, а всяким числам.

Буквы для обозначения чисел берутся обыкновенно из латинского (или французского) алфавита.

б) Для сокращенного выражения правила, посредством которого можно решать задачи, сходные по условиям, но различающиеся только величиной данных чисел. Положим, напр., мы решаем задачу: найти 3% числа 520. Тогда рассуждаем так: так как 1% какого-нибудь числа составля $\frac{1}{100}$ этого числа, то

$$1\% \text{ числа } 520 \text{ составляет } \frac{520}{100} = 5{,}2,$$

$$\text{а } 3\% \text{ „ „ „ } \frac{520}{100} \times 3 = 15{,}6.$$

Решив несколько подобного рода задач, мы замечаем, что для нахождения процентов какого-нибудь числа достаточно разделить это число на 100 и результат умножить на число процентов. Чтобы выразить это наглядно, мы предложим задачу в таком общем виде: найти $p\%$ числа a.

Задачу решаем так:

$$1\% \text{ числа } a \text{ составляет } \frac{a}{100},$$

$$p\% \text{ „ „ „ } \frac{a}{100} \times p.$$

Обозначив искомое число буквой x, мы можем написать равенство:

$$x = \frac{a}{100} \times p,$$

из которого прямо видно, как можно находить проценты от любого данного числа.

Подобно этому, если мы желаем кратко выразить правило умножения или деления дроби на дробь, мы обозначаем дроби буквами: $\frac{a}{b}$ и $\frac{c}{d}$ и пишем равенства:

$$\frac{a}{b} \times \frac{c}{d} = \frac{ac}{bd}; \quad \frac{a}{b} : \frac{c}{d} = \frac{ad}{bc}.$$

Заметим, что *всякое равенство, выражающее посредством букв и знаков действий какое-нибудь предложение, касающееся чисел, называется формулой.*

- Укажем еще некоторые арифметические формулы.

Если буквой n обозначим любое целое число, то произведение $2n$ выразит любое четное число.

Так, если вместо n будем подставлять целые числа: 1, 2, 3, 4, ..., то произведение $2n$ даст: $2 \cdot 1 = 2$; $2 \cdot 2 = 4$; $2 \cdot 3 = 6$; $2 \cdot 4 = 8$, и т. д.

При n целом сумма $2n+1$ выражает любое нечетное число; так, если $n=0, 1, 2, 3, 4, \ldots$, то сумма $2n+1$ даст: $2\cdot 0+1=0+1=1$; $2\cdot 1+1=2+1=3$; $2\cdot 2+1=4+1=5$, и т. д.

Если в каком-нибудь двузначном числе на месте десятков стоит цифра a, а на месте единиц цифра b, то всех единиц в таком числе будет $10a+b$. Напр., в числе, у которого десятков 7, а простых единиц 9, всего единиц будет $10\cdot 7+9=70+$ $+9=79$.

Равным образом, если в трехзначном числе на месте сотен стоит цифра a, на месте десятков — цифра b и на месте единиц — цифра c, то всех единиц в таком числе должно быть $100a+$ $+10b+c$. Напр., если в числе 3 сотни, 5 десятков и 8 единиц, то всего единиц оно содержит $100\cdot 3+10\cdot 5+8=358$.

Приведем еще некоторые формулы, известные из геометрии.

Если основание и высоту прямоугольника измерим одной и той же линейной единицей и для основания получим число b, а для высоты — число h, то площадь p этого прямоугольника, выраженная в соответствующих квадратных единицах, будет $p=bh$.

При тех же обозначениях для треугольника получим формулу $p={}^1/_2bh$, для трапеции $p={}^1/_2\,(b_1+b_2)\,h$, где b_1 и b_2 означают числа, измеряющие в одной и той же единице оба основания трапеции; для площади круга мы пишем формулу $p=\pi R^2$, где R — радиус, π — отвлеченное число, означающее отношение длины окружности к ее диаметру (оно равно приблизительно 3,14); для объема V шара применяется формула $V=\frac{4}{3}\pi R^3$ и т. п.

2. Алгебраическое выражение. Если несколько чисел, обозначенных буквами (или буквами и цифрами), соединены между собой посредством знаков, указывающих, какие действия надо произвести над числами, то такое обозначение называется алгебраическим выражением. Таковы, напр., обозначения:

$$\frac{a}{100}\times p;\quad ab;\quad 2x+1.$$

Для краткости речи мы часто будем, вместо „алгебраическое выражение“, говорить просто „выражение“.

Вычислить какое-нибудь выражение для данных численных значений букв значит подставить в него на место букв эти численные значения и произвести все указанные в выражении действия; число, получившееся после этого, называется численной величиной алгебраического выражения для данных численных значений букв. Так, численная величина выражения

$$\frac{a}{100} \times p$$

при $p = 3$ и $a = 520$ равна $\frac{520}{100} \times 3 = 5{,}2 \times 3 = 15{,}6$.

3. Действия, рассматриваемые в алгебре, следующие: сложение, вычитание, умножение, деление, возвышение в степень и извлечение корня. Что такое первые четыре действия, известно из арифметики. Пятое действие — возвышение в степень — представляет собой особый случай умножения, когда перемножаются несколько одинаковых сомножителей. Произведение таких сомножителей называется степенью, а число их — показателем степени. Если какое-нибудь число берется сомножителем 2 раза, то произведение называется второй степенью; если какое-нибудь число берется сомножителем 3 раза, то произведение называется третьей степенью, и т. д. Так, вторая степень 5 есть произведение 5×5, т. е. 25; третья степень $^1/_2$ есть произведение $^1/_2 \cdot {}^1/_2 \cdot {}^1/_2$, т. е. $^1/_8$, и т. п. Первою степенью числа принято называть само это число.

Вторая степень называется иначе квадратом, а третья степень — кубом. Причина этих названий состоит в том, что произведение $a \times a$ выражает (в квадратных единицах) площадь квадрата со стороною в a линейных единиц, а произведение $a \times a \times a$ выражает (в кубических единицах) объем куба с ребром в a линейных единиц.

Об извлечении корня мы пока говорить не будем, так как это действие в начале алгебры не рассматривается[1].

4. Знаки, употребляемые в алгебре. Для обозначения первых четырех действий в алгебре употребляются те же знаки, как и в арифметике, только знак умножения, как мы уже говорили, обыкновенно не пишется, если оба сомножителя, или один из них, обозначены буквами. Напр., вместо $a \times b$ (или вместо $a \cdot b$) пишут просто ab и вместо $3 \times a$ пишут $3a$. Как знак деления, безразлично, употребляется или двоеточие (:), или черта (горизонтальная или наклонная), так, выражения:

---

[1] Есть еще одно действие, рассматриваемое в алгебре, — нахождение логарифма; о нем тоже будет сказано впоследствии.

$$a : b,\ \frac{a}{b},\ a/b$$

означают одно и то же, а именно, что число a делится на другое число b.

Возвышение в степень принято сокращенно выражать так: пишут число, которое требуется повторить сомножителем, а над ним, с правой стороны, ставят другое число — показатель степени, выражающий, сколько раз возвышаемое число должно быть повторено сомножителем. Так, 3^4 (читается: три в четвертой степени) заменяет собою подробное обозначение: $3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3$. Если при числе не стоит никакого показателя степени, то можно подразумевать при нем показателем единицу; напр., a означает то же самое, что и a^1, так как первою степенью числа принято называть само это число.

Равенство чисел обозначается знаком $=$, а неравенство или знаком $>$ (больше) или знаком $<$ (меньше). Напр., если написано

$$5+2=7;\ 5+2>6;\ 5+2<10,$$

то это значит: $5+2$ равно 7; $5+2$ больше 6; $5+2$ меньше 10.

Для указания порядка действий употребляются скобки; например, выражение:

$$a\{b-[c+(d-e)]\}$$

показывает, что действия над числами a, b, c, d и e должны быть выполнены в таком порядке: из d вычитается e, полученная разность прикладывается к c, полученная сумма вычитается из b и на эту разность умножается a; значит, сначала производятся действия, указанные внутри малых скобок ( ), потом действия, указанные внутри ломаных скобок [ ], затем действия, стоящие внутри фигурных скобок { }.

Замечание. Для сокращения письма принято в некоторых случаях скобки не ставить, а только подразумевать их. Напр., скобки не ставятся при обозначении последовательных сложений, вычитаний и умножений; так,

вместо $[(a+b)+c]+d$ пишут $a+b+c+d$;
» $[(a-b)-c]-d$ » $a-b-c-d$;
» $[(ab)c]\,d$ » $abcd$,

В этих случаях порядок действий указывается самим выражением (слева направо).

В некоторых других случаях также принято скобки опускать; мы об этом скажем тогда, когда представится надобность.

5. Исторические сведения. В древние времена математики (главным образом греческие, индусские и арабские) очень мало пользовались математическими знаками (символами) для обозначений действий над числами. Математические предложения выражались большею частью словами и писались посредством тех же письменных знаков, которые служили для выражения речи вообще. В XV—XVI столетиях стали появляться особые знаки действий и отношений. Раньше других были введены знаки + и —, появившиеся впервые в рукописи великого итальянского живописца и архитектора *Леонардо да-Винчи*, а затем и в печатной арифметике немецкого математика *Видмана* (в 1489 г.). Знак умножения (×) был введен (в 1631 г.) английским математиком *Оутрехтом*.

Для обозначения равенства введен был (в 1557 г.) английским алгебраистом *Рекордом* знак $=$; „ибо,— как писал он,— никакие два предмета не могут быть более равными, чем две параллельные линии одинаковой длины“. Другой английский математик *Херриот* ввел знаки $>$ и $<$ (в 1631 г.) и точку как знак умножения.

Знаменитым немецким математиком *Лейбницем* (в 1694 г.) впервые введен знак (:) для обозначения деления, которое раньше обозначалось чертою.

Скобки ( ), [ ] и { } встречаются впервые в трудах фламандского математика *Жирара* (в 1629 г.). Величайший французский математик XVII столетия *Франциск Вьета* вместо скобок употреблял черту, которую он ставил над выражением, рассматриваемым как одно целое. Он же стал употреблять буквы для обозначения чисел (впервые буквы появились в работах немецкого монаха *Иеронима Неморариуса* в XII столетии).

Знаменитый французский философ и математик *Рене Декарт* в XVII столетии ввел в употребление для обозначения неизвестных чисел последние буквы алфавита и для обозначения данных чисел первые буквы алфавита.

К началу XVIII века алгебраическое знакоположение достигло своего полного развития и с тех пор почти не изменялось (лишь с развитием науки добавлены были некоторые новые обозначения).

Глава вторая.

Свойства первых четырех арифметических действий.

6. Сложение. а) Возьмем сумму нескольких слагаемых, напр. $7+3+2$. Мы можем производить сложение или в том порядке, в каком слагаемые написаны: $7+3=10$; $10+2=12$, или же можем переставить слагаемые, напр., так: $3+2+7$, и произвести сложение в этом порядке: $3+2=5$; $5+7=12$. Как бы мы ни изменяли порядок данных слагаемых, сумма их остается одна и та же, именно 12.

Это свойство сложения называется **переместительным**, так как оно состоит в том, что *сумма не изменяется от перемещения слагаемых.*

Если обозначим слагаемые буквами a, b, c,..., то переместительное свойство сложения мы можем выразить такими равенствами:

$$a+b+c+\ldots=b+c+a+\ldots=c+a+b+\ldots,$$

где ряд точек означает, что слагаемых может быть и более трех.

б) Возьмем ту же сумму $3+7+2$. Вместо того, чтобы вычислять ее так, как мы это делали сейчас, т. е. к первому слагаемому прибавить второе и к полученной сумме прибавить третье, мы можем взять из этой суммы какие угодно два слагаемые, напр. 7 и 2, сложить их: $7+2=9$ и полученное число прибавить к первому слагаемому: $3+9=12$.

Свойство это называется **сочетательным**, так как оно состоит в том, что *сумма не изменяется от соединения (от сочетания) каких-либо слагаемых в одно число.*

В применении к трем слагаемым это свойство (в соединении с переместительным свойством) можно выразить такими равенствами:

$$a+b+c=a+(b+c)=b+(a+c)=c+(a+b),$$

показывающими, что мы можем сложить какие-нибудь два числа и затем их сумму сложить с третьим числом.

в) Пусть требуется к числу 325 прибавить число 243, т. е. прибавить сумму $200+40+3$. Для этого можно к 325 приложить отдельно 200, потом 40, затем 3. Значит, *чтобы к какому-нибудь числу приложить сумму, можно к этому числу приложить каждое слагаемое отдельно одно за другим.* Это можно выразить такою формулою:

$$a+(b+c+d+\ldots)=a+b+c+d+\ldots$$

Полезно вспомнить еще следующее свойство сложения:

г) *Если какое-нибудь слагаемое увеличим (или уменьшим), то сумма увеличится (или уменьшится) и притом на столько же.*

7. **Вычитание.** а) Пусть из 849 надо вычесть 325, т. е. вычесть сумму $300+20+5$. Для этого можно вычесть из 849 отдельно 300, 20 и 5. Значит, *чтобы из какого-нибудь числа вычесть сумму, можно вычесть из этого числа каждое слагаемое отдельно одно за другим.*

Это свойство можно выразить такою формулою:

$$a-(b+c+d+\ldots)=a-b-c-d-\ldots$$

Полезно вспомнить еще следующие свойства вычитания. Так как уменьшаемое можно всегда рассматривать как сумму, а вычитаемое и остаток как слагаемые, то

б) *если увеличим (или уменьшим) уменьшаемое, то разность увеличится (или уменьшится) и притом на столько же;*

в) *если увеличим (или уменьшим) вычитаемое, то разность уменьшится (или увеличится) и притом на столько же;*

г) *если увеличим (или уменьшим) на одно и то же число уменьшаемое и вычитаемое, то разность не изменится.*

8. **Умножение.** а) Умножение, как и сложение, обладает переместительным свойством, т. е. *произведение не изменяется от перемещения сомножителей.*

Так:

$$2\cdot 5\cdot 7=5\cdot 7\cdot 2=7\cdot 5\cdot 2=\ldots$$

$$\frac{3}{4}\cdot\frac{1}{2}\cdot 5=\frac{1}{2}\cdot 5\cdot\frac{3}{4}=5\cdot\frac{3}{4}\cdot\frac{1}{2}=\ldots$$

Вообще:

$$abc=acb=bac=bca=\ldots$$

б) Так же, как и сложение, умножение обладает и сочетательным свойством: *произведение не изменится, если какие-либо сомножители будут заменены их произведением.*

Так, произведение $7\cdot 2\cdot 5$ не изменится, если мы сомножители 2 и 5 заменим их произведением, т. е. вместо того, чтобы вычислять это произведение в том порядке, в каком написаны сомножители: $7\cdot 2\cdot 5=14\cdot 5=70$, станем вычислять его в порядке, указанном такими скобками $7\cdot(2\cdot 5)=7\cdot 10=70$.

Действительно, произведение $7\cdot 2\cdot 5$ означает, что 7 повторяется слагаемым 2 раза и полученная сумма повторяется затем слагаемым еще 5 раз; значит, произведение можно написать так:

$$(7+7)+(7+7)+(7+7)+(7+7)+(7+7).$$

Но вместо того, чтобы прибавлять сумму $7+7$, мы можем прибавить 7 и затем еще в другой раз 7; значит, написанная нами сумма должна быть такая же, как и

$$7+7+7+7+7+7+7+7+7+7,$$

т. е. она должна равняться $7 \cdot 10$. В применении к произведению трех сомножителей сочетательное свойство (в соединении с переместительным) можно выразить такими равенствами:

$$abc = a(bc) = b(ac) = c(ab).$$

в) Пусть требуется умножить 526 на 3, другими словами, требуется умножить сумму $500 + 20 + 6$ на 3. Для этого, как мы знаем, можно умножить на 3 отдельно каждое слагаемое и результаты сложить. Подобно этому, чтобы умножить сумму $5 + {}^3/_4 + 2$ на 8, можно умножить на 8 отдельно 5, ${}^3/_4$ и 2 и результаты сложить:

$$\left(5 + \frac{3}{4} + 2\right) \cdot 8 = 5 \cdot 8 + \frac{3}{4} \cdot 8 + 2 \cdot 8 = 40 + 6 + 16 = 62.$$

Точно так же, если требуется умножить разность на какое-нибудь число, то для этого можно умножить на это число отдельно уменьшаемое и вычитаемое и из первого результата вычесть второй. Например:

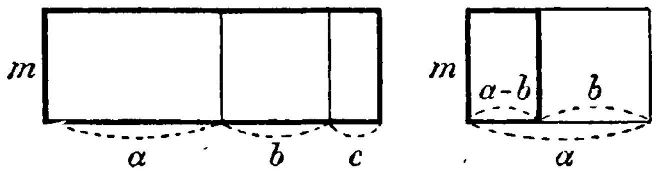
$$(12 - 10) \cdot 3 = 12 \cdot 3 - 10 \cdot 3 = 36 - 30 = 6;$$

или

$$\left(2\frac{1}{2} - \frac{3}{4}\right) \cdot 8 = 2\frac{1}{2} \cdot 8 - \frac{3}{4} \cdot 8 = 20 - 6 = 14.$$

Таким образом, *чтобы умножить сумму (или разность) на какое-нибудь число, можно умножить на это число каждое слагаемое отдельно (или уменьшаемое и вычитаемое отдельно) и результаты сложить (или вычесть).*

Это свойство называется распределительным, так как действие умножения, производимое над суммою или разностью, распределяется на каждое данное число в отдельности.



Черт. 1.

Распределительное свойство умножения можно наглядно объяснить геометрически так.

Возьмем четыре отрезка прямой: один в a единиц длины, другой в b, третий в c и четвертый в m таких же единиц длины. Затем построим прямоугольни[illegible] один с основанием, равным

$a+b+c$, и другой с основанием $a-b$; высоту у того и у другого возьмем в m линейных единиц. Площадь первого прямоугольника равна произведению $(a+b+c)m$, а второго — произведению $(a-b)m$. Из чертежа непосредственно усматриваем, что первый прямоугольник есть сумма трех прямоугольников с площадями am, bm и cm, а второй прямоугольник составляет разность двух прямоугольников с площадями am и bm; следовательно:

$$(a+b+c)m=am+bm+cm \text{ и } (a-b)m=am-bm.$$

Так как произведение не меняется от перемены мест сомножителей, то написанные сейчас равенства можно переписать так:

$$m(a+b+c)=ma+mb+mc$$

и

$$m(a-b)=ma-mb,$$

что можно высказать словами таким образом: *чтобы умножить какое-нибудь число на сумму (или на разность), можно умножить это число на каждое слагаемое отдельно (или на уменьшаемое и вычитаемое отдельно) и результаты сложить (или вычесть).*

г) Пусть надо умножить 7 на 30, т. е. на произведение $3\cdot10$. Для этого можно умножить 7 на 3 и полученный результат умножить на 10:

$$7\cdot(3\cdot10)=7\cdot3\cdot10.$$

Подобно этому

$$7\cdot\left(\frac{3}{4}\cdot\frac{5}{6}\right)=7\cdot\frac{3}{4}\cdot\frac{5}{6},$$

и вообще:

$$a(bc)=abc;$$

$$a(bcd)=abcd, \text{ и т. п.}$$

Значит, *чтобы умножить какое-нибудь число на произведение, можно умножить это число сначала на первый сомножитель, потом полученное произведение умножить на второй сомножитель, затем на третий и т. д.*

д) Пусть требуется умножить произведение $2\cdot5\cdot8$ на 10. Для этого можно умножить на 10 какой-нибудь один сомножитель, оставив другие без изменения:

$$(2\cdot5\cdot8)\cdot10=(2\cdot10)\cdot5\cdot8=2\cdot(5\cdot10)\cdot8=2\cdot5\cdot(8\cdot10);$$

получим во всех случаях одно и то же число 800.

Вообще: $(abc\ldots)m = (am)bc\ldots = a(bm)c\ldots = \ldots$

Значит, *чтобы умножить произведение на какое-нибудь число, можно умножить на это число только один сомножитель, оставив все другие без изменения.*

9. Деление. Деление можно рассматривать как такое действие (обратное умножению), посредством которого по данному произведению и одному из сомножителей отыскивается другой сомножитель. Поэтому правильность деления всегда можно поверять умножением: если, умножив частное на делитель, получим делимое, то деление сделано правильно.

Напр., деление:

$$\frac{2}{3} : \frac{4}{5} = \frac{2 \cdot 5}{3 \cdot 4}$$

верно, так как $\frac{2 \cdot 5}{3 \cdot 4} \cdot \frac{4}{5} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 4}{3 \cdot 4 \cdot 5}$, что по сокращении на 4 и на 5 дает делимое $\frac{2}{3}$.

Полезно вспомнить, что деление на какое-нибудь число равносильно умножению на обратное число; так:

$$\frac{2}{3} : \frac{4}{5} = \frac{10}{12} = \frac{5}{6} \text{ и } \frac{2}{3} \cdot \frac{5}{4} = \frac{10}{12} = \frac{5}{6}.$$

Из свойств деления укажем следующие:

а) *Чтобы разделить сумму (или разность) на какое-нибудь число, можно разделить на это число каждое слагаемое (или уменьшаемое и вычитаемое) отдельно и результаты сложить (или вычесть).*

Так:

$$(20 + 8 + 2{}^1/_2) : 4 = 5 + 2 + {}^5/_8,$$

в чем можно убедиться поверкой

$$(5 + 2 + {}^5/_8) \cdot 4 = 20 + 8 + {}^5/_2.$$

Подобно этому:

$$(30 - 0{,}6) : 3 = 10 - 0{,}2.$$

Вообще:

$$(a + b + c) : m = \frac{a}{m} + \frac{b}{m} + \frac{c}{m}$$

и

$$(a - b) : m = \frac{a}{m} - \frac{b}{m},$$

в чем легко убедиться поверкой.

Свойство это можно назвать распределительным свойством деления.

б) *Чтобы разделить какое-нибудь число на произведение, можно разделить это число сначала на первый сомножитель, потом результат разделить на второй сомножитель, затем на третий и т. д.*

Так:

$$120 : (2 \cdot 5 \cdot 3) = [(120 : 2) : 5] : 3 = (60 : 5) : 3 = 12 : 3 = 4,$$

или

$$10 : \left(\frac{3}{4} : \frac{5}{6}\right) = \left(10 : \frac{3}{4}\right) : \frac{5}{6} = \frac{40}{3} : \frac{5}{6} = \frac{240}{15} = \frac{80}{5} = 16.$$

Вообще:

$$a : (bcd) = [(a : b) : c] : d,$$

в чем можно убедиться поверкою.

в) *Чтобы разделить произведение на какое-нибудь число, можно разделить на это число какой-нибудь один сомножитель, оставив все другие без изменения.*

Так, чтобы разделить произведение 40 · 12 · 8 на 4, можно разделить на 4 один из сомножителей: 40 или 12, или 8:

$$(40 \cdot 12 \cdot 8) : 4 = 10 \cdot 12 \cdot 8 = 40 \cdot 3 \cdot 8 = 40 \cdot 12 \cdot 2.$$

Во всех случаях получим одно и то же число 960.

Вообще:

$$(abc) : m = \frac{a}{m} bc = a \frac{b}{m} c = ab \frac{c}{m},$$

в чем можно убедиться поверкою.

г) Укажем еще следующее важное свойство деления:

Если делимое и делитель умножим (или разделим) на одно и то же число, то частное не изменится.

Возьмем, напр., деление:

$$8 : 3 = \frac{8}{3},$$

и умножим делимое и делитель, положим, на 5; тогда получим новое частное:

$$(8 \cdot 5) : (3 \cdot 5) = \frac{8 \cdot 5}{3 \cdot 5},$$

которое по сокращении его на 5 даст прежнее частное $^8/_3$. Возьмем еще пример на деление дробей:

$$\frac{3}{4} : \frac{5}{6} = \frac{3 \cdot 6}{4 \cdot 5}.$$

Умножим делимое и делитель, положим, на $^2/_7$; тогда получим новое частное:

$$\left(\frac{3}{4} \cdot \frac{2}{7}\right) : \left(\frac{5}{6} \cdot \frac{2}{7}\right),$$

которое, согласно правилам умножения и деления дробей, равно

$$\frac{3 \cdot 2}{4 \cdot 7} : \frac{5 \cdot 2}{6 \cdot 7} = \frac{3 \cdot 2 \cdot (6 \cdot 7)}{4 \cdot 7 \cdot (5 \cdot 2)} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 7}{4 \cdot 7 \cdot 5 \cdot 2},$$

что по сокращении на 2 и на 7 дает прежнее частное $\frac{3 \cdot 6}{4 \cdot 5}$.

Вообще, какие бы числа a, b и m ни были, всегда $(am) : (bm) = a : b$, что можно написать и так:

$$\frac{am}{bm} = \frac{a}{b}.$$

Если частное не изменяется от умножения делимого и делителя на одно и то же число, то оно не изменяется и от деления делимого и делителя на одно и то же число, так как деление на какое-нибудь число равносильно умножению на обратное число.

10. Замечание. Свойство, которое мы сейчас указали, обыкновенно в арифметике высказывается так: *если увеличим (или уменьшим) делимое и делитель в одинаковое число раз, то частное не изменится*; значит, другими словами, этим выражалось, что частное не изменится, если мы умножим (или разделим) делимое и делитель на одно и то же целое число. Теперь мы видим, что оно не изменяется и от умножения (или деления) делимого и делителя на одно и то же какое угодно число, целое или дробное.

11. Применения свойств действий. Указанными свойствами действий можно пользоваться:

1) Для преобразования алгебраических выражений, напр.:

а) $a + b + a + 2 + b + a + 8$. Пользуясь сочетательным свойством сложения, сгруппируем слагаемые так: $(a + a + a) +$

$+(b+b)+(2+8)$. Эту сумму короче можно написать так: $(a\cdot 3)+(b\cdot 2)+10$, что, пользуясь переместительным свойством умножения, можно переписать так: $3a+2b+10$.

б) $a+(b+a)$. Чтобы к числу a прибавить сумму $(b+a)$, достаточно к a прибавить b и затем еще a; получим $a+b+a$. Сгруппируем слагаемые так: $(a+a)+b$. Эту сумму можно написать короче: $a\cdot 2+b$ и еще короче: $2a+b$.

в) $a\cdot(3xxa)$. Чтобы умножить число a на произведение $3xxa$, достаточно a умножить на 3, полученный результат умножить на x и т. д. Получим $a3xxa$. Пользуясь сочетательным свойством умножения, сгруппируем сомножители так: $3(aa)(xx)$.

Это произведение можно короче написать: $3a^2x^2$.

г) $\left(\frac{1}{5}ax\right)\cdot 10$. Чтобы умножить произведение на 10, достаточно умножить на 10 один какой-нибудь сомножитель. Умножим $\frac{1}{5}$ на 10; тогда получим $2ax$.

д) $(a+x+1)\cdot 3$. Согласно распределительному свойству умножения, получим: $(a\cdot 3)+(x\cdot 3)+(1\cdot 3)$, что можно написать так: $3a+3x+3$.

е) $\frac{9ab}{3}$. Чтобы разделить произведение $9ab$ на 3, достаточно разделить на 3 один сомножитель 9; разделив, получим $3ab$.

2) Для разъяснения некоторых свойств чисел. Пусть, напр., требуется разъяснить следующее свойство трехзначного числа: если к какому-нибудь трехзначному числу припишем справа то же самое трехзначное число, то полученное таким образом шестизначное число делится без остатка и на 7, и на 11, и на 13. Возьмем, напр., число 756; приписав к нему с правой стороны 756, получим 756 756. Число это делится на 7, на 11 и на 13:

$$756\,756 : 7 = 108\,108;\quad 756\,756 : 11 = 68\,796;\quad 756\,756 : 13 = 58\,212.$$

Чтобы объяснить, почему это так, обозначим взятое трехзначное число одною буквой a. Приписать к этому числу с правой стороны такое же число — это все равно, что умножить a на 1000 (т. е. приписать к a три нуля) и затем прибавить к полученному произведению число a.

Например:

$$756\,756 = 756\,000 + 756 = 756\cdot 1000 + 756.$$

Таким образом, шестизначное число, полученное указанным путем, должно быть равно сумме $a \cdot 1000 + a$, что, очевидно, составляет $a \cdot 1001$. Чтобы разделить это произведение на какое-нибудь число, можно, как мы знаем, разделить на это число только один сомножитель 1001. Но число 1001 как раз равно произведению $7 \cdot 11 \cdot 13$; значит, оно делится и на 7, и на 11, и на 13. Поэтому и все шестизначное число разделится и на 7, и на 11, и на 13.

Глава третья.

Положительные и отрицательные числа (относительные числа).

I. Понятие о величинах, которые можно понимать в двух противоположных смыслах.

12. Задача 1. Термометр в полночь показывал 2 градуса, а в полдень 5 градусов. На сколько градусов изменилась температура от полуночи до полудня?

В этой задаче условия выражены недостаточно полно: надо еще указать: 2 градуса тепла или 2 градуса холода показывал термометр в полночь, т. е. вершина ртутного столбика в термометре была в полночь на 2 деления выше или на 2 деления ниже той черты, на которой стоит 0°; подобные же указания должны быть сделаны и относительно температуры в полдень. Если и в полночь, и в полдень термометр указывал тепло, то температура за этот промежуток времени повысилась от 2 до 5 градусов, значит, изменилась на 3 градуса; если же в полночь термометр указывал 2 градуса холода (ниже 0°), а в полдень 5 градусов тепла (выше 0°), то температура повысилась на $2 + 5$, т. е. на 7 градусов. Могло случиться и так, что в полночь температура была 2° холода и в полдень 5° тоже холода (тогда температура не повысилась, а понизилась на 3 градуса), или так, что в полдень температура была 2° тепла, а в полдень 5° холода (тогда температура понизилась на 7 градусов).

В этой задаче речь идет о величине, имеющей направление: число градусов температуры можно отсчитывать вверх от нулевой черты термометра и вниз от нее. Принято температуру выше 0° (тепло) считать положительной и обозначать числом градусов со знаком $+$, а температуру ниже 0° (холод) считать отрицательной и обозначать числом градусов со знаком — (не будет недоразумения, если первое число брать совсем без знака).

Выразим теперь нашу задачу, примерно, так: термометр в полночь показывал —2°, а в полдень +5°. На сколько градусов изменилась температура от полуночи до полудня? В таком виде задача получает вполне определенный ответ: температура повысилась на 2+5, т. е. на 7 градусов.

Задача 2. Когда скорый поезд Октябрьской железной дороги (соединяющей Москву с Ленинградом) находился на расстоянии 100 километров от станции Бологое (эта станция лежит приблизительно посредине между Москвой и Ленинградом), тогда пассажирский поезд этой дороги был на расстоянии 50 километров от Бологого. На каком расстоянии находились тогда эти два поезда друг от друга?

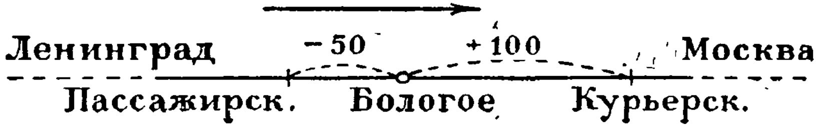
В таком виде задача эта представляется не вполне определенной: в ней не сказано, находились ли поезда по одну сторону от Бологого, например в сторону по направлению к Ленинграду, или же они были по разным сторонам от Бологого. Если первое, то расстояние между поездами было, очевидно, 100 — 50, т. е. 50 километров, а если второе, то это расстояние было 100 + 50, т. е. 150 километров. Значит, для того, чтобы эта задача была определенною, недостаточно задать величину расстояния поездов от Бологого, но еще нужно указать, в каком направлении эти расстояния надо считать от Бологого.

Мы имеем здесь опять пример величины, в которой, кроме ее размера, можно рассматривать еще направление,— это расстояние, считаемое по какой-нибудь линии (напр. по железной дороге) от определенного на ней места (напр. от станции Бологое). Расстояние это можно считать и в одном направлении (напр. к Москве), и в другом противоположном (напр. к Ленинграду). Обыкновенные (арифметические) числа недостаточны для выражения и размера, и направления расстояний. Условимся в подобных случаях поступать так.

Назовем какое-нибудь одно из двух направлений Октябрьской дороги (напр. направление от Ленинграда к Москве) положительным, а противоположное направление (от Москвы к Ленинграду) — отрицательным; сообразно этому расстояния, считаемые в положительном направлении, будем называть положительными расстояниями, а расстояния, считаемые в отрицательном направлении, будем называть отрицательными. Первые будем выражать числами со знаком + (или вовсе без знака), а вторые —

числами со знаком —. Так, если поезд находится в месте, отстоящем на 100 километров от Бологого по направлению к Москве, то мы будем говорить, что его расстояние от Бологого равно + 100 километрам (или просто 100 *км*); если же поезд находится, положим, на 50 *км* от Бологого по направлению к Ленинграду, то мы скажем, что его расстояние от Бологого равно —50 километрам. Здесь знаки + и —, конечно, не означают действий сложения и вычитания, а только служат условно для обозначения направлений.

Выразим теперь нашу задачу так: когда курьерский (скорый) поезд Октябрьской железной дороги находился от Бологого на расстоянии +100 *км* (или просто 100 *км*), тогда пассажирский поезд этой дороги был от Бологого на расстоянии —50 *км*. Как велико было тогда расстояние между этими поездами?



Черт. 2.

Теперь задача выражена вполне точно, и ответ на нее получается определенный (см. черт. 2, на котором стрелка указывает положительное направление дороги): поезда находились на расстоянии 100 + 50, т. е. 150 километров.

13. Другие величины, которые можно понимать в двух противоположных смыслах. Кроме величин, указанных в предыдущих задачах, многие другие также имеют направление, т. е. они могут быть рассматриваемы в двух противоположных смыслах, Таковы, например:

доход	в	противоположном	смысле	будет	расход,
выигрыш	„	„	„	„	проигрыш,
прибыль	„	„	„	„	убыток,
имущество	„	„	„	„	долг и т. п.

Если доход, выигрыш, прибыль, имущество... условимся считать величинами положительными и выражать их числами со знаком + (или без знака), то расход, проигрыш, убыток, долг... надо считать величинами того же рода, но отрицательными, и выражать их числами со знаком —; тогда можно говорить, что расход есть отрицательный доход, проигрыш есть отрицательный выигрыш и т. д. При таком соглашении понятны будут, напр., такие словесные выражения: жилищное товарищество получило дохода с квартир: в январе +200 руб., в феврале +150 руб., в марте —50 руб. (значит, в марте получился убыток 50 руб.); или такие: у старшего брата имущества было на 5000 руб., у среднего на 3000 руб., у младшего на —500 руб. (значит, у младшего брата не было имущества, а был долг в 500 руб.).

Должно, однако, заметить, что на-ряду с указанными величинами существует очень много других, в которых нельзя указать „направления“; напр., нельзя понимать в двух противоположных смыслах такие величины, как объем, площадь и многие другие.

14. Относительные числа. Числа, рассматриваемые в арифметике, служат для выражения таких величин, которых направление не рассматривается (когда, напр., интересуются знать только размер какого-нибудь расстояния, а не направления, по которому его надо считать). Числа же, рассматриваемые в алгебре, служат для выражения размера величин и их направления. Для этого величину, понимаемую в каком-нибудь одном смысле, выражают числом с предшествующим ему знаком +, а ту же величину, понимаемую в противоположном смысле, выражают числом с предшествующим ему знаком —.

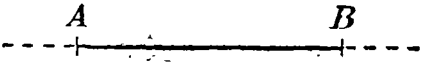
Число с предшествующим ему знаком + (который, впрочем, может быть и опускаем) называется положительным; число с предшествующим ему знаком — называется отрицательным. Так, $+10, +\frac{1}{2}, +0{,}3$ положительные числа, а $-8, -\frac{5}{7}, -3{,}25$ отрицательные числа. К числам присоединяют еще 0 (нуль), не относя его ни к положительным, ни к отрицательным. Выражения $+0, -0$ и просто 0 считают равносильными.

Числа положительные, отрицательные и нуль называются относительными числами в отличие от чисел обыкновенных (или арифметических), которые не имеют перед собой никакого знака.

Абсолютною величиною относительного числа называется это число, взятое без знака; так, абсолютная величина числа —10 есть 10, абсолютная величина числа +5 есть 5.

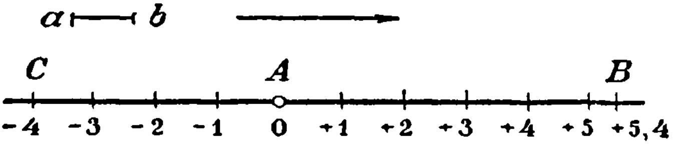
Два относительных числа считаются равными, если у них одинаковы абсолютные величины и знаки.

15. Изображение чисел помощью отрезков прямой. Отрезком прямой (черт. 3) называется часть какой-нибудь прямой линии, ограниченная с обеих сторон, напр., с одной стороны точкой A, с другой точкой B. В каждом отрезке можно различать: во-первых, длину его, во-вторых, направление, которое для данного отрезка может быть двоякое. Напр., во взятом нами отрезке можно различать направление или от точки A к точке B, или, наоборот, от B к A. Если мы рассматриваем взятый отрезок в направлении от A к B, то точку A мы будем называть началом отрезка, а точку B — его концом.



Черт. 3.

Такими отрезками мы наглядно можем выражать относительные числа следующим образом. Возьмем какую-нибудь прямую (напр. горизонтальную) и условимся, какое из двух направлений этой прямой считать положительным (черт. 4). Примем, напр., направление слева направо (указанное стрелкою) за положительное, тогда противоположное направление — справа налево — мы будем считать отрицательным. Далее, примем какую-нибудь длину ab (изображенную на чертеже) за единицу длины. Пусть теперь дано какое-нибудь положительное число, напр. $+5{,}4$.



Черт. 4.

Возьмем на нашей прямой произвольную точку A и отложим вправо от нее 5,4 единиц длины, равных ab. Тогда получим отрезок AB, длина которого равна 5,4 единицы и направление положительное. Этот отрезок и выразит нам наглядно число $+5{,}4$. Возьмем теперь какое-нибудь отрицательное число, напр. -4. Чтобы изобразить его наглядно, отложим от той же точки A влево 4 единицы длины. Тогда получим отрезок AC, длина которого равна 4 единицам, а направление отрицательное; значит, этот отрезок выражает число -4.

Можно представить себе, что все относительные числа выражены направленными отрезками, отложенными на одной и той же прямой от одной и той же ее точки A, принятой за начало отрезков. Тогда на той части прямой, которая расположена направо от A, изобразится ряд положительных чисел, а на части прямой расположенной влево от A, изобразятся отрицательные числа. Число нуль выражается на этой прямой не отрезком, а одной точкой A. Такая прямая часто называется **числовою прямою.**

Так как направление отрезков, выражающих числа со знаком $+$, противоположно направлению отрезков, выражающих числа со знаком $-$, то и самые эти знаки принято называть **противоположными** знаками. Всякие два числа, как $+3$ и -3, $+{}^1\!/_2$ и $-{}^1\!/_2$ и т. п., у которых знаки противоположны, а абсолютные величины одинаковы, называются **противоположными числами.**

Рассмотрим теперь, как производятся различные действия над относительными числами.

II. Сложение относительных чисел.

16. Задача. Кооперативное товарищество получило прибыли в январе 300 руб., в феврале 250 руб. и в марте -100 руб (значит, в марте был убыток 100 руб.). Сколько прибыли получило товарищество за эти три месяца?

Искомая прибыль, очевидно, составляет $300+250-100=$ $=450$ руб.

Можно сказать, что прибыль есть сумма трех относительных чисел: $+300$, $+250$ и -100, разумея при этом, что 100 руб. убытка погашаются 100 руб. прибыли и, следовательно, уменьшают общую прибыль на 100 руб.

Подобным образом можно складывать между собой и други противоположные величины, напр. доход и расход, выигрыш и проигрыш, имущество и долг и т. п. Особенность такового сложения состоит в том, что *две противоположные величины, имеющие одинаковую абсолютную величину, при сложении взаимно уничтожаются* (дают в сумме нуль).

17. Сложение двух чисел. Пусть требуется сложить два числа с одинаковыми знаками, напр. $+3$ и $+5$, или -3 и -5. Это значит, что складываются величины одного и того же „направления“: 3 руб. дохода с 5 руб. дохода, 3 руб. расхода с 5 руб. расхода, и т. п. Очевидно, что в первом случае получится 8 руб. дохода, во втором случае 8 руб. расхода. Значит:

$$(+3)+(+5)=+8;\quad (-3)+(-5)=-8.$$

Таким образом, *чтобы сложить два числа одинаковых знаков, надо сложить их абсолютные величины и оставить тот же знак.*

Пусть требуется сложить два числа с разными знаками, напр., $(+5)$ и (-3), или (-5) и $(+3)$. Это значит, что складываются величины противоположного смысла: 5 руб. прибыли с 3 руб. убытка, или 5 руб. расхода с 3 руб. дохода, и пр. Очевидно, что в первом случае получится 2 руб. прибыли, а во втором 2 руб. расхода. Значит:

$$(+5)+(-3)=+2;\quad(-5)+(+3)=-2.$$

Таким образом, *чтобы сложить два числа разных знаков, надо найти разность их абсолютных величин и перед нею поставить знак того числа, у которого абсолютная величина больше.*

Отбросив знак $+$ перед положительным числом, мы можем написанные сейчас равенства переписать короче:

$$5+(-3)=2;\quad -5+3=-2.$$

Замечания. а) *Сумма двух противоположных чисел равна нулю.* Так:

$$(+3)+(-3)=0;\quad(-8)+(+8)=0.$$

Напр., если я продвинулся вперед на 3 шага, а затем отодвинулся назад также на 3 шага, то в результате я не продвинулся ни вперед, ни назад.

б) *Прибавить 0 к какому-нибудь числу или прибавить к 0 какое-нибудь число — значит, очевидно, оставить это число без изменения.*

Так:

$$(+3)+0=+3;\quad 0+(-5)=-5.$$

18. Другое выражение правил сложения. Два правила сложения, указанные нами, можно заменить двумя другими правилами, очень удобными для применения.

а) *Прибавить положительное число — значит прибавить его абсолютную величину.*

Так:

$$(+7)+(+3)=+10 \text{ и } (+7)+3=7+3=10;$$

$$(-7)+(+3)=-4 \text{ и } (-7)+3=-7+3=-4.$$

б) *Прибавить отрицательное число—значит отнять его абсолютную величину.*

Так:

$$(+7)+(-10)=-3 \text{ и } (+7)-10=7-10=-3;$$
$$(-7)+(-10)=-17 \text{ и } (-7)-10=-7-10=-17.$$

Эти два правила можно сокращенно выразить такими **формулами двойных знаков**:

$$+(+a)=+a;\ +(-a)=-a.$$

19. Сложение трех и более чисел. Сначала находят сумму двух первых слагаемых, к ней прибавляют третье слагаемое, и т. д. Пусть, напр., требуется найти сумму:

$$(+8)+(-5)+(-4)+(+3),$$

которую можно короче выразить так:

$$8+(-5)+(-4)+3.$$

Производим сложение в таком порядке:

$$8+(-5)=3;\ 3+(-4)=-1;\ (-1)+3=2.$$

Впрочем, такого порядка нет надобности всегда придерживаться, как это будет видно из свойств суммы, которую мы вскоре укажем.

III. Вычитание относительных чисел.

20. Задача. Прибыль фабрики за 2 месяца, январь и февраль, составила a руб. Как велика была прибыль за один февраль, если известно, что за январь фабрика дала b руб. прибыли?

Прибыль за два месяца составляет, конечно, сумму прибылей, полученных отдельно за каждый из этих месяцев. Это остается верным и тогда, когда прибыль за какой-нибудь месяц была **отрицательная**, т. е. когда эта прибыль была на самом деле убытком. Так, если прибыль за январь была $+2000$ руб., а за февраль -500 руб., то за эти два месяца вместе прибыль составляла сумму $(+2000)+(-500)=+1500$ руб. Поэтому искомая прибыль за февраль должна быть таким числом (положительным или отрицательным), которое, будучи сложено (по правилам сложения относительных чисел) с прибылью за январь, составит в сумме прибыль за оба месяца.

Таким образом, в нашей задаче дана сумма a и одно слагаемое b, а требуется отыскать другое слагаемое. *Действие, посредством которого по данной сумме и одному слагаемому находится другое слагаемое, называется* вычитанием, безразлично, будут ли даны числа арифметические или относительные; при этом данная сумма называется уменьшаемым, данное слагаемое — вычитаемым, а искомое число — разностью (или остатком). Обозначив искомую разность в нашей задаче буквой x, мы можем написать:

$$x = a - b.$$

Из этого следует, что правильность вычитания мы всегда можем поверять сложением: найдя искомую разность, сложим ее с вычитаемым; если в сумме получим уменьшаемое, то вычитание сделано верно.

21. Нахождение разности как одного из двух слагаемых. Найдем разность $a - b$ в следующих частных случаях:

а) $a = 1000$, $b = 400$.

Тогда $x = 1000 - 400 = 600$ (поверка: $600 + 400 = 1000$).

б) $a = 1000$, $b = 1000$; значит, за 2 месяца январь и февраль, получилась такая же прибыль, как и за один январь. Это могло случиться только тогда, когда за февраль не было ни прибыли, ни убытка; другими словами, когда за февраль прибыль была 0 руб.

Таким образом:

$$x = 1000 - 1000 = 0$$

(поверка: $1000 + 0 = 1000$).

в) $a = 1000$, $b = 1200$; значит, за 2 месяца прибыль была меньше, чем за один январь, и меньше на 200 руб. Это могло случиться только тогда, когда февраль принес не прибыль, а убыток, и притом убыток в 200 руб.; другими словами, когда за февраль прибыль была -200 руб.

Таким образом:

$$x = 1000 - 1200 = -200$$

(поверка: $(-200) + 1200 = 1000$).

В этом случае нам пришлось вычесть большее число (1200) из меньшего (из 1000). Такое вычитание было бы невозможно, если бы мы ограничивались арифметическими числами; для относительных же чисел вычитание всегда возможно, а именно: *разность от вычитания большего числа из меньшего равна избытку большего числа над меньшим, взятому со знаком —.*

Так:

$1000 - 1200 = -200$, потому что $(-200) + 1200 = 1000$;
$3 - 5^1/_2 = -2^1/_2$, „ „ $(-2^1/_2) + 5^1/_2 = 3$;
$0 - 8 = -8$, „ „ $(-8) + 8 = 0$; и т. п.

г) $a = 1000$, $b = -200$; значит, за два месяца прибыль фабрики была 1000 руб., тогда как за один январь был убыток в 200 руб. Это могло произойти только тогда, когда размер прибыли за февраль превосходил размер январского убытка на 200 руб.

Таким образом:

$$x = 1000 - (-200) = 1000 + 200 = 1200$$

(поверка: $1200 + (-200) = 1000$).

д) $a = -100$, $b = 800$, т. е. за январь и февраль вместе был убыток в 100 руб., тогда как за один январь была прибыль в 800 руб. Это могло быть, очевидно, только тогда, когда в феврале был убыток, размер которого превосходил размер прибыли за январь на 900 руб.

Таким образом:

$$x = -100 - 800 = -900$$

(поверка: $(-900) + 800 = -100$).

е) $a = -100$, $b = -150$, т. е. за 2 месяца был убыток в 100 руб., а за один январь был убыток в 150 руб. Так как за два месяца убыток оказался меньше, чем за один январь, то, значит, февраль принес прибыль, а именно: прибыль в 50 руб.

Таким образом:

$$x = (-100) - (-150) = 50$$

(поверка: $50 + (-150) = -100$).

22. Правило вычитания. Из рассмотрения всех этих случаев вычитания мы можем вывести следующее **правило**: *чтобы вы-*

честь какое-нибудь число, достаточно к уменьшаемому приложить (по правилам сложения) число, противоположное вычитаемому.

Так, мы сейчас видели (в случае **г**), что

$$1000-(-200)=1200.$$

Но то же самое число мы получим, если вместо того, чтобы вычитать —200, к уменьшаемому 1000 приложим число, противоположное вычитаемому, т. е. число +200:

$$1000+(+200)=1200.$$

Точно так же мы видели (в случае **е**), что

$$(-100)-(-150)=50;$$

но то же самое число мы получим, если к —100 приложим по правилу сложения число +150:

$$(-100)+(+150)=+50=50.$$

Подобно этому, и во всех других рассмотренных случаях вычитания действие это можно заменить сложением уменьшаемого с числом, противоположным вычитаемому.

Так:

1) $1000-400=600$ и $1000+(-400)=600$;
2) $1000-1000=0$ и $1000+(-1000)=0$;
3) $1000-1200=-200$ и $1000+(-1200)=-200$;
4) $(-100)-800=-900$ и $(-100)+(-800)=-900$.

23. Формулы двойных знаков. Таким образом, согласно данному правилу, вычитание положительного числа $+a$ можно заменить прибавлением отрицательного числа $-a$, а вычитание отрицательного числа $-a$ можно заменить прибавлением положительного числа $+a$; это можно выразить такими **формулами двойных знаков**:

$$-(+a)=-a; \quad -(-a)=+a.$$

Эти формулы уподобляются тем формулам двойных знаков, которые были указаны для сложения (§ 18):

$$+(+a)=+a; \quad +(-a)=-a;$$

24. Алгебраическая сумма и разность. Относительные числа дают возможность всякую разность представить в виде суммы, и наоборот, сумму изобразить в виде разности. Напр., разность $7-3$ может быть написана так: $(+7)+(-3)$, или проще: $7+(-3)$; сумма $4+2$ может быть изображена так: $(+4)-(-2)$, или проще: $4-(-2)$.

Подобно этому всякое выражение, представляющее собой ряд последовательных сложений и вычитаний, может быть представлено в виде суммы.

Например:

$$20-5+3-7=20+(-5)+3+(-7).$$

Сумма, в которой слагаемые могут быть числами положительными, отрицательными и равными нулю, принято называть алгебраическою суммою, в отличие ее от арифметической суммы, в которой все слагаемые числа обыкновенные (арифметические). Равным образом разность называется алгебраической, если в ней уменьшаемое и вычитаемое числа относительные.

IV. Главнейшие свойства сложения и вычитания относительных чисел.

25. Убедимся на примерах, что те свойства сложения и вычитания арифметических чисел, которые мы указали для чисел арифметических (§§ 6, 7), принадлежат также и числам относительным:

а) Переместительное свойство: *сумма не изменяется от перемещения слагаемых.*

Например:

$$(-4)+(+3)+(-1)+(+5)=+3;$$
$$(-4)+(-1)+(+5)+(+3)=+3;$$
$$(+5)+(-1)+(-4)+(+3)=+3, \text{ и т. п.}$$

Если, напр., торговец, продав четыре предмета, получил прибыли на одном из них 3 руб., на другом 5 руб., на третьем же имел убыток 4 руб. и на четвертом также убыток 1 руб., то для него безразлично, в каком порядке следовали эти продажи: проданы ли были сначала те предметы, на которых получена прибыль, или как-нибудь иначе; при всяком порядке результат будет один и тот же: после четырех продаж торговец получил прибыли 3 рубля.

б) **Сочетательное свойство**: *сумма не изменится, если какие-нибудь слагаемые мы заменим их суммою.*

Так, при вычислении суммы:

$$(-4)+(+3)+(-1)+(+5)=+3,$$

вместо того, чтобы производить сложение в том порядке, в каком написаны слагаемые, мы можем какие-нибудь из них, напр. второе и третье, заменить их суммою, вычислив ее предварительно: $(+3)+(-1)=+2$; тогда будем иметь: $(-4)+(+2)+$ $+(+5)=3$, т. е. мы получим ту же сумму, как и прежде. Можно было бы какие-нибудь три слагаемые, напр. 2-е, 3-е и 4-е, заменить их суммою: $(+3)+(-1)+(+5)=+7$; тогда мы получим: $(-4)+(+7)=+3$, т. е. получим ту же сумму $+3$.

в) *Чтобы к какому-нибудь числу прибавить сумму нескольких слагаемых, можно к этому числу прибавить каждое слагаемое отдельно одно за другим.*

Пусть, напр., требуется к числу 40 прибавить сумму $20+(-5)+(+7)$, что можно выразить так:

$$40+[20+(-5)+(+7)].$$

Мы можем сначала вычислить прибавляемую сумму:

$$20+(-5)=20-5=15;\quad 15+(+7)=15+7=+22$$

и затем полученное число $+22$ приложить к 40:

$$40+(+22)=+62.$$

Но вместо этого мы можем к 40 прибавить сначала первое слагаемое 20, потом второе слагаемое -5 и, наконец, третье слагаемое $+7$:

$$40+20=60;\quad 60+(-5)=55;\quad 55+(+7)=+62.$$

Окончательная сумма оказывается та же самая.

г) *Чтобы от какого-нибудь числа отнять сумму нескольких слагаемых, можно от этого числа отнять каждое слагаемое отдельно одно за другим.*

Пусть, напр., нам желательно из 20 вычесть сумму $10+(-4)+(-3)$, что можно выразить так:

$$20-[10+(-4)+(-3)].$$

Мы можем сначала вычислить отнимаемую сумму:

$$10+(-4)=10-4=6;\quad 6+(-3)=6-3=3$$

и затем полученное число отнять от 20:

$$20-3=17.$$

Но вместо этого мы можем отнять от 20 сначала первое слагаемое 10, затем второе слагаемое -4 и, наконец, третье слагаемое -3:

$$20-10=10;\ 10-(-4)=10+4=14;\ 14-(-3)=14+3=17.$$

Мы получили то же самое число, как и прежде.

V. Умножение относительных чисел.

26. Определение. Как известно из арифметики, *умножение на целое число есть действие, посредством которого множимое повторяется слагаемым столько раз, сколько единиц во множителе, а умножение на дробь есть действие, посредством которого находится эта дробь от множимого.* Оба эти определения вполне применимы и к умножению относительных чисел, когда множитель есть положительное число; стóит только условиться положительное число рассматривать как обыкновенное арифметическое. Напр., умножить -5 на $+3$ (или просто на 3) — значит повторить -5 слагаемым 3 раза (получим -15); умножить 0 на $+5$ — значит повторить число 0 слагаемым 5 раз (получим 0); умножить -12 на $+{}^3/_4$ (или просто на $^3/_4$) — значит найти $^3/_4$ от -12 (получим -9).

Умножение на отрицательное число мы условимся понимать в таком особом смысле: *умножить какое-нибудь множимое на отрицательный множитель — значит умножить множимое на абсолютную величину множителя и полученное произведение взять с противоположным знаком.* Так, умножить -3 на -2 — значит умножить -3 на 2 (получим -6) и результат взять с противоположным знаком (получим $+6$).

27. Вывод правила умножения. Рассмотрим следующие четыре случая умножения:

а) $(+10)(+2)$; б) $(-10)(+2)$; в) $(+10)(-2)$; г) $(-10)(-2)$.

В первом случае надо $+10$ повторить слагаемым 2 раза, от чего получим $+20$; во втором случае надо -10 повторить слагаемым 2 раза, отчего получим -20. В третьем и четвертом случаях надо множимое умножить на 2 и результат взять с противоположным знаком. Значит, в третьем случае получим -20, а в четвертом $+20$. Таким образом:

$$\begin{array}{llll}
(+10)(+2)=+20; & \text{вообще} & (+a)(+b)=+ab; \\
(-10)(+2)=-20; & \text{„} & (-a)(+b)=-ab; \\
(+10)(-2)=-20; & \text{„} & (+a)(-b)=-ab; \\
(-10)(-2)=+20; & \text{„} & (-a)(-b)=+ab.
\end{array}$$

Правило. *Чтобы найти произведение двух относительных чисел, надо перемножить их абсолютные величины и произведение взять со знаком + в том случае, когда перемножаемые числа имеют одинаковые знаки, и со знаком — в том случае, когда они противоположных знаков.*

Часть этого правила, касающаяся знаков, носит название правила знаков; его обыкновенно выражают так: при умножении двух чисел одинаковые знаки дают +, а разные дают —.

Можно также сказать, что от умножения на положительное число знак множимого не меняется, а при умножении на отрицательное число он изменяется на противоположный.

К указанным случаям умножения мы должны еще присоединить тот случай, когда множимое или множитель будет нуль: *произведение любого числа на нуль и произведение нуля на любое число принимается равным нулю.* Так: $(+3)\cdot 0=0$; $(-5)\cdot 0=0$; $0\cdot(-4)=0$, и т. п.

28. Чтобы показать полезность данного выше правила умножения относительных чисел, рассмотрим следующую задачу.

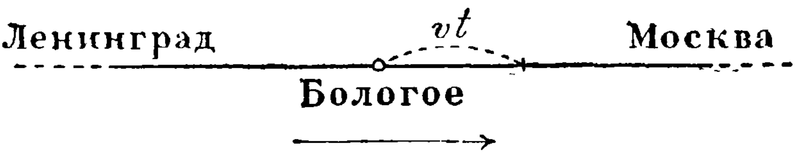
Задача. В полдень поезд Октябрьской железной дороги (соединяющий Ленинград с Москвою) проследовал через станцию Бологое (расположенную, приблизительно, посредине между Ленинградом и Москвою). Определить место, в котором находился этот поезд в момент времени, отстоящий от полудня (того же дня) на t часов, если известно, что поезд двигался со скоростью v *км* в каждый час (предполагается для простоты, что поезд двигался безостановочно).

Положим, что в этой задаче буквы t и v означают какие-нибудь арифметические числа (пусть, напр., скорость поезда была

40 *км* в час, а момент времени, в который требуется определить местонахождение поезда, отстоял от полудня на 3 часа). Тогда в ответ на вопрос задачи мы только можем сказать, что в указанный момент времени поезд находился на таком расстоянии от Бологого, какое он может пройти в t часов, т. е. на расстоянии, равном vt *км*. Но мы не можем сказать, нужно ли это расстояние считать от Бологого по направлению к Москве или по направлению к Ленинграду, так как, во-первых, в задаче не указано, в каком направлении двигался поезд: от Ленинграда к Москве или от Москвы к Ленинграду, и, во-вторых, мы не знаем, идет ли речь о моменте времени, который был позже полудня на t часов, или же о том моменте, который был раньше полудня на t часов. Таким образом, наша задача, чтобы быть вполне определенной, должна распасться на следующие 4 отдельные задачи:

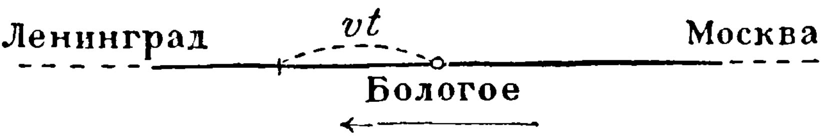
1) В полдень поезд, двигавшийся от Ленинграда к Москве со скоростью v *км* в час, проходил через станцию Бологое. Определить местонахождение этого поезда через t часов после полудня.

Тогда ответ будет таков: в указанный момент времени поезд находился на расстоянии vt *км* от Бологого по направлению к Москве (черт. 5).



Черт. 5.

2) В полдень поезд, двигавшийся от Москвы к Ленинграду со скоростью v *км* в час, проследовал через станцию Бологое. Определить местонахождение этого поезда через t часов после полудня.

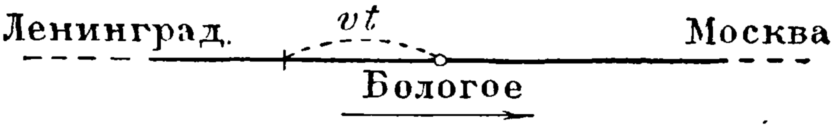


Черт. 6.

Ответ будет: на расстоянии vt *км* от Бологого по направлению к Ленинграду (черт. 6).

3) В полдень поезд, двигавшийся от Ленинграда к Москве со скоростью v *км* в час, проходил через станцию Бологое. Определить местонахождение этого поезда за t часов до полудня.

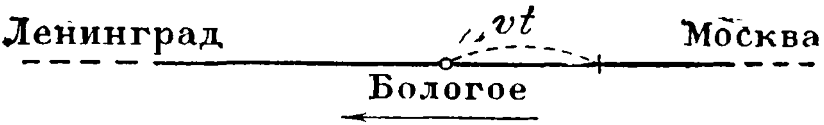
Ответ: на расстоянии vt *км* от Бологого по направлению к Ленинграду (черт. 7).



Черт. 7.

4) В полдень поезд, двигавшийся от Москвы к Ленинграду со скоростью v *км* в час, проходил через станцию Бологое. Определить местонахождение этого поезда за t часов до полудня.

Ответ: на расстоянии vt *км* от Бологого по направлению к Москве (черт. 8).



Черт. 8.

Введение в алгебру отрицательных чисел и правил действий над ними позволяет эти четыре отдельные задачи выразить одною общею задачею и дать для нее одно общее решение. Для этого предварительно условимся, во-первых, какое из двух возможных направлений пути (от Ленинграда к Москве, или наоборот) считать за положительное и какое за отрицательное; и, во-вторых, какой промежуток времени, следующий за полуднем или предшествующий ему, считать положительным и какой отрицательным. Условимся, напр., скорость поезда при движении его от Ленинграда к Москве считать положительной, а скорость при обратном движении — от Москвы к Ленинграду — считать отрицательной: таким образом, мы будем, напр., говорить: поезд двигался со скоростью $+40$ *км* в час, или поезд двигался со скоростью -35 *км* в час, разумея при этом, что в первом случае поезд шел от Ленинграда к Москве со скоростью 40 *км* в час, а во втором случае он шел от Москвы к Ленинграду со скоростью 35 *км* в час. Далее, условимся считать положительными все те промежутки времени, которые следуют за полуднем; напр., мы будем говорить, что момент времени, в который требуется определить местонахождение поезда, отстоит от полудня на +4 часа, или момент этот отстоит от полудня на —3 часа, разумея при этом, что в первом случае момент времени надо считать позднее полудня на 4 часа, а во втором случае его надо брать раньше полудня на 3 часа.

Допустим теперь, что в задаче нашей буквы t и v будут означать не числа арифметические, как мы прежде предполагали, а числа относительные; напр., t может означать в задаче и +4, и —3; v может означать и +40, и —35, и другие относительные числа. Тогда мы можем сказать, что задача наша включает в себе все четыре частные случая, указанные выше, и точным ответом на нее будет следующий общий ответ:

в указанный момент времени расстояние поезда от Бологого равно vt *км*, если под произведением vt относительных чисел условимся разуметь произведение их абсолютных величин, взятое со знаком плюс в том случае, когда оба сомножителя числа положительные или оба числа отрицательные, и со знаком минус в том случае, когда один сомножитель число положительное, а другой отрицательное. При этом условии наш общий ответ (указанный выше) будет годен для всех частных случаев. Действительно:

1) Пусть буквы v и t означают положительные числа, напр. $v = +40$ и $t = +3$. Эти задания означают, что поезд шел по направлению от Ленинграда к Москве со скоростью 40 *км* в час и что требуется определить местонахождение поезда в момент времени, бывший 3 часа после полудня. В этом случае искомое место лежит, как мы видели, на 120 *км* от Бологого по направлению к Москве (см. черт. 5). Значит, искомое расстояние равно +120 *км*. Но, согласно нашему условию, и произведение vt в этом случае дает: $(+40)(+3) = +120$. Следовательно, искомое расстояние равно произведению vt *км*.

2) Пусть v отрицательное число, напр. —40, а t положительное число, напр. +3. Эти задания надо понимать в том смысле, что поезд шел от Москвы к Ленинграду, и надо определить его место в момент, бывший 3 часа после полудня. Мы видели, что тогда оно лежит на 120 *км* от Бологого, по направлению к Ленинграду (см. черт. 6), т. е. искомое расстояние равно —120 *км*. Но и произведение vt в этом случае дает: $(-40)(+3) = -120$; значит, искомое расстояние равно vt *км*.

3) Пусть v положительное число, напр. $+40$, а t отрицательное число, напр. -3. Эти задания означают, что поезд шел от Ленинграда к Москве, и требуется определить его место в момент, бывший за 3 часа до полудня. Это место находится на 120 *км* от Бологого по направлению к Ленинграду (см черт. 7), значит, искомое расстояние равно -120 *км*. Но и произведение vt в этом случае дает: $(+40)(-3)=-120$; следовательно, искомое расстояние равно vt *км*.

4) Пусть, наконец, и v, и t означают отрицательные числа, напр. $v=-40$, $t=-3$. Эти задания означают, что поезд шел по направлению от Москвы к Ленинграду и что момент времени, в который требуется определить местонахождение поезда, был за 3 часа до полудня. В этом случае, как мы видели, искомое место лежит на расстоянии 120 *км* от Бологого по направлению к Москве (см. черт. 8), т. е. искомое расстояние равно $+120$ *км*. Но и произведение vt в этом случае дает: $(-40)(-3)=+120$; значит, и теперь можно сказать, что искомое расстояние равно vt *км*.

29. Произведение трех и более чисел. Пусть требуется вычислить произведение:

$$(+2)(-1)(+3)(-10)(-4)(-5).$$

Для этого умножим первое число на второе, полученное произведение умножим на третье число, вновь полученное произведение умножим на четвертое число и т. д.:

$$(+2)(-1)=-2;\ (-2)(+3)=-6;\ (-6)(-10)=+60;$$
$$(+60)(-4)=-240;\ (-240)(-5)=+1200.$$

Если бы перемножались только одни положительные числа, то знак окончательного произведения должен быть, конечно, $+$. Но когда все или некоторые сомножители отрицательные, то произведение окажется со знаком $+$ в том случае, когда число отрицательных сомножителей четное, и со знаком $-$ в том случае, когда число таких сомножителей нечетное. Так:

1 отрицат. сомножитель
$(+2)(-1)(+3)=-6;$

2 отрицат. сомножителя
$(+2)(-1)(+3)(-10)=+60,$

3 отрицат. сомножителя
$(+2)(-1)(+3)(-10)(-4)=-240,$ и т. д.

Причина этого заключается в том, что каждый раз, как нам приходится умножать на отрицательное число, знак множимого переменяется, а когда приходится умножать на положительное число, он остается без изменения.

VI. Деление относительных чисел.

30. Определение. *Деление относительных чисел (как и арифметических) есть действие (обратное умножению), посредством которого по данному произведению двух сомножителей и одному из этих сомножителей отыскивается другой.* Так, разделить $+10$ на -2 — значит найти такое число x, чтобы произведение $(-2)x$ или, все равно, произведение $x(-2)$ равнялось $+10$; такое число есть, и только одно, именно -5, так как произведение -5 на -2 равно $+10$, а произведение какого-нибудь иного числа на -2 не может составить $+10$.

Из этого определения следует, что правильность деления можно поверять умножением; именно, если, умножив частное на делитель, мы получим делимое, то действие сделано верно.

31. Вывод правила деления. Рассмотрим следующие примеры деления относительных чисел:

$(+10):(+2)=+5$, потому что $(+2)(+5)=+10$;
$(-10):(-2)=+5$, „ „ $(-2)(+5)=-10$;
$(-10):(+2)=-5$, „ „ $(+2)(-5)=-10$;
$(+10):(-2)=-5$, „ „ $(-2)(-5)=+10$.

Из этих примеров выводим правило: *чтобы разделить одно число на другое, надо разделить абсолютную величину делимого на абсолютную величину делителя и результат взять со знаком $+$, когда оба данные числа имеют одинаковые знаки, и со знаком $-$, когда они имеют разные знаки*

Таким образом, правило знаков при делении остается то же самое, что и при умножении.

32. Другое правило деления. Из арифметики мы знаем, что деление равносильно умножению на число, обратное делителю. То же самое мы можем сказать и о делении относительных чисел, если условимся числом, обратным данному относительному числу a, называть такое число, которое получается от деления $+1$ на a. Действительно:

$$(-10):(+5)=-2 \quad \text{и} \quad (-10)\cdot\left(+\frac{1}{5}\right)=-\frac{10}{5}=-2;$$

$$(-40):(-8)=+5 \quad \text{и} \quad (-40)\cdot\left(-\frac{1}{8}\right)=+\frac{40}{8}=+5.$$

33. Случаи, когда делимое или делитель равны нулю.

а) Пусть требуется разделить 0 на какое-нибудь число, напр. на $+10$. Это значит, что требуется найти такое число, которое надо умножить на $+10$, чтобы получить в произведении 0. Такое число есть 0 и только 0, так как $0 \cdot (+10) = 0$, а произведение какого-нибудь другого числа, не нуля, на $+10$ не может, очевидно, равняться 0. Подобным образом находим:

$$0 : (-2) = 0, \text{ потому что } (-2) \cdot 0 = 0;$$

$$0 : \frac{3}{4} = 0, \quad \text{»} \quad \text{»} \quad \frac{3}{4} \cdot 0 = 0, \text{ и т. п.}$$

Значит, *если делимое равно нулю, а делитель не равен нулю, то частное должно быть нуль.*

б) Положим теперь, что делитель будет 0, а делимое какое-нибудь другое число, напр. $(+5) : 0$. Это значит, что требуется найти такое число, которое надо умножить на 0, чтобы получить $+5$. Но какое бы число мы ни умножали на 0, мы всегда получим 0, а не число $+5$; значит, частное $(+5) : 0$ не может равняться никакому числу. Подобно этому невозможны деления:

$$(-5) : 0; \quad (+0{,}3) : 0; \quad (-7{,}26) : 0, \text{ и т. п.}$$

Вообще, *если делитель равен нулю, а делимое не равно нулю, то деление невозможно.*

в) Возьмем, наконец, такой случай, когда и делимое равно нулю и делитель равен нулю:

$$0 : 0 = ?$$

В этом случае частное может равняться любому числу, так как всякое число, умноженное на нуль, дает в произведении также нуль.

VII. Некоторые свойства умножения и деления.

34. Убедимся на примерах, что те свойства умножения и деления, которые мы указали для чисел арифметических (§§ 8 и 9), принадлежат также к числам относительным.

а) Переместительное свойство: *произведение не изменяется при изменении порядка сомножителей.*

Возьмем сначала примеры умножения только двух чисел.

$$(+5)(+2)=+10 \quad \text{и} \quad (+2)(+5)=+10;$$
$$(-5)(+2)=-10 \quad \text{и} \quad (+2)(-5)=-10;$$
$$\left(-\frac{2}{5}\right)\left(-\frac{3}{4}\right)=+\frac{6}{20} \quad \text{и} \quad \left(-\frac{3}{4}\right)\left(-\frac{2}{5}\right)=+\frac{6}{20}, \text{ и т. п.}$$

Свойство это применимо и к тому случаю, когда какой-нибудь сомножитель есть 0, если примем, что произведение равно нулю, когда какой-нибудь сомножитель есть нуль. Тогда

$$0\cdot(+3)=0 \text{ и } (+3)\cdot 0=0; \quad 0\cdot(-5)=0 \text{ и } (-5)\cdot 0=0.$$

Возьмем теперь произведение, состоящее более чем из двух сомножителей, например такое:

$$(-2)(-5)(+3).$$

Абсолютная величина этого произведения равна $2\cdot5\cdot3$, знак же окажется + или —, смотря по тому, четное или нечетное число отрицательных сомножителей (в нашем примере знак будет +). Если мы переставим сомножители, например, так:

$$(+3)(-5)(-2),$$

то получим новое произведение, у которого абсолютная величина равна $3\cdot5\cdot2$, а знак будет + или —, смотря по тому, четное или нечетное число будет отрицательных сомножителей. Но $3\cdot5\cdot2=2\cdot5\cdot3$ (по переместительному свойству умножения арифметических чисел), и число отрицательных сомножителей, очевидно, остается то же самое, что и прежде; значит, у обоих произведений абсолютная величина будет одна и та же и знаки одинаковы; поэтому:

$$(-2)(-5)(+3)=(+3)(-5)(-2).$$

б) Сочетательное свойство: *произведение не изменится, если какие-либо из сомножителей будут заменены их произведением.*

Так, вместо того, чтобы производить умножение $(-5)(+3)(-2)$ в том порядке, в каком написаны сомножители:

$$(-5)(+3)=-15; \quad (-15)(-2)=+30,$$

мы можем взять любые два сомножителя, например $+3$ и -2, и заменить их произведением, т. е. числом -6, и потом умножить на это число третий сомножитель: $(-5)(-6)=+30$. Таким образом:

$$(-5)(+3)(-2)=(-5)\,[(+3)(-2)].$$

в) *Чтобы умножить какое-нибудь число на произведение, можно умножить это число на первый сомножитель, полученное произведение умножить на второй сомножитель и т. д.*

Так, чтобы умножить $+10$ на произведение $(-2)(+3)$, мы можем сначала вычислить это произведение (оно равно -6) и затем на него умножить $+10$ (получим -60); но можем умножить $+10$ сначала на -2 (получим -20) и затем полученное произведение умножить на $+3$ (получим -60). Таким образом:

$$(+10)\,[(-2)\,(+3)] = (+10)\,(-2)\,(+3).$$

Вообще:

$$a\,(bc) = abc.$$

г) *Чтобы разделить какое-нибудь число на произведение, можно разделить это число на первый сомножитель, полученное частное разделить на второй сомножитель, это частное разделить на третий сомножитель, и т. д.*

Так, чтобы разделить -40 на произведение $(+5)(-2)$, можно сначала найти это произведение (оно равно -10) и затем разделить -40 на полученное число (получим $+4$); но можно разделить -40 сначала на $+5$ (получим -8), а затем полученное число разделить на -2 (получим $+4$). Таким образом:

$$(-40):[(+5)\,(-2)] = [(-40):(+5)]:(-2).$$

Вообще:

$$a:(bc) = (a:b):c.$$

д) Распределительное свойство: *чтобы умножить (или разделить) алгебраическую сумму на какое-нибудь число, можно умножить (или разделить) на это число каждое слагаемое отдельно и результаты сложить.*

Пусть, например, надо сумму $(+8)+(-2)+(-3)$ умножить на -10. Вместо того, чтобы сначала вычислить эту сумму (она равна $+3$) и потом ее умножить на -10 (получим -30), мы можем умножить на -10 каждое слагаемое отдельно и потом полученные числа сложить:

$$(+8)(-10) = -80; \quad (-2)(-10) = +20; \quad (-3)(-10) = +30;$$

$$-80 + 20 + 30 = -30.$$

Вообще:

$$(a + b + c)\,m = am + bm + cm$$

и

$$(a+b+c):m=\frac{a}{m}+\frac{b}{m}+\frac{c}{m}$$

е) Покажем еще, что *если делимое и делитель умножим (или разделим) на одно и то же число, то частное не изменится.*

Как мы видели прежде (§ 9, г) равенство

$$\frac{a}{b}=\frac{am}{bm}$$

верно для всяких чисел арифметических, как целых, так и дробных. Теперь мы проверим, что это равенство остается верным и тогда, когда все или некоторые буквы a, b и m будут означать числа отрицательные.

Возьмем какой-нибудь пример деления:

$$5:0,8$$

и умножим делимое и делитель, положим, на $3^1/_2$. От этого частное не изменится, так как все числа арифметические, и потому мы можем написать равенство:

$$\frac{5}{0,8}=\frac{5\cdot 3^1/_2}{0,8\cdot 3^1/_2}.$$

Пусть теперь в этом равенстве какое-нибудь число сделается отрицательным; пусть, например, вместо 5 будет -5:

$$\frac{-5}{0,8}=\frac{-5\cdot 3^1/_2}{0,8\cdot 3^1/_2}.$$

После такой перемены равенство все-таки осталось верным, так как теперь оба частные сделались отрицательными, а абсолютные величины их остались прежние. Заменим еще какое-нибудь другое арифметическое число отрицательным; например, вместо $3^1/_2$ возьмем $-3^1/_2$:

$$\frac{-5}{0,8}=\frac{-5\cdot(-3^1/_2)}{0,8\cdot(-3^1/_2)}.$$

Равенство все-таки осталось верным, так как абсолютные величины обоих частных не изменились и оба они отрицательные числа.

Так же легко проверить, что равенство остается верным и тогда, когда третье число сделаем отрицательным.

Значит, какие бы положительные или отрицательные числа под буквами a, b и m мы ни разумели, равенство

$$\frac{a}{b}=\frac{am}{bm}$$

остается всегда верным.

Частное не изменится также и от деления делимого и делителя на одно и то же число, так как деление равносильно умножению на обратное число.

Заметим, однако, что число, на которое мы умножаем (или делим) делимое и делитель, не должно быть нулем. Например, равенство:

$$\frac{2}{3}=\frac{2\cdot 0}{3\cdot 0}$$

неверно так как правая часть этого равенства равна частному $0:0$, а это частное может равняться всякому числу, тогда как $^2/_3$ есть определенное число.

Глава четвертая.

Понятие об уравнении.

35. Равенства и их свойства. Два числа или два алгебраических выражения, соединенные между собой знаком $=$, составляют равенство. Числа эти, или выражения, называются частями равенства; то, что стоит налево от знака $=$, составляет левую часть, а то, что стоит направо от этого знака, составляет правую часть. Например, в равенстве:

$$a+a+a=a\cdot 3$$

левая часть есть сумма $a+a+a$, а правая — произведение $a\cdot 3$.

Обозначив каждую часть равенства одною буквою, мы можем главнейшие свойства равенства выразить так:

а) Если $a=b$, то и $b=a$, т. е. *части равенства мы можем менять местами.* Если, например, $a+b+c=a+(b+c)$, то и $a+(b+c)=a+b+c$.

б) Если $a=b$ и $b=c$, то и $a=c$, т. е. *если два числа равны каждое одному и тому же третьему числу, то они равны и между собой.*

Например:

$4^2=16$; $16=8\cdot 2$; следовательно, $4^2=8\cdot 2$.

в) Если $a = b$ и m какое угодно число, то $a + m = b + m$ и $a - m = b - m$, т. е. *если к равным числам прибавим или от них вычтем одно и то же число, то равенство не нарушится.* Например, если $a + b = c$, то, отняв от обеих частей по b, получим $a = c - b$; или если $x - 2 = 8$, то, прибавив по 2, найдем: $x = 8 + 2 = 10$.

г) Если $a = b$, то $am = bm$ и $\frac{a}{m} = \frac{b}{m}$; т. е. *если равные числа умножим или разделим на одно и то же число, то равенство не нарушится.* Например, если $\frac{x}{2} = 3$, то, умножив обе части равенства на 2, получим равенство: $x = 6$; или, если $2x = 14$, то, разделив обе части на 2, найдем: $x = 7$.

Полезно обратить внимание на то, что *умножение или деление обеих частей равенства на -1 равносильно перемене знаков перед частями равенства.* Так, если обе части равенства $-x = -5$ умножить на -1, то получим: $x = 5$.

36. Тождество. Два алгебраических выражения называются тождественными, если при всяких численных значениях входящих в них букв они имеют одну и ту же численную величину. Таковы, например, выражения:

$$ab \text{ и } ba; \quad a + (b + c) \text{ и } a + b + c.$$

Если в каком-нибудь равенстве обе его части составляют тождественные алгебраические выражения, то такое равенство называется тождеством. Таково, например, равенство:

$$a + b + c = a + (b + c).$$

Тождеством называется также и такое равенство, в которое входят только числа, выраженные цифрами, если обе его части, по выполнении всех действий, указанных в них, дают одно и то же число; например:

$$(40 \cdot 5) : 8 = 5^2.$$

37. Уравнение. Положим, мы желаем решить такую задачу: сколько сторон должно быть в выпуклом многоугольнике, чтобы сумма всех его внутренних углов равнялась 10 прямым углам?

Обозначим буквою x неизвестное число сторон выпуклого многоугольника. Тогда сумма внутренних углов его в градусах выразится, как мы знаем из геометрии[1]), формулой $180^\circ (x - 2)$. По условию задачи формула эта должна дать 10 прямых углов, т. е. 900°; значит:

$$180 (x - 2) = 900.$$

Это равенство нельзя назвать тождеством, так как выражения $180 (x - 2)$ и 900 имеют одинаковую численную величину не при всяком численном значении буквы x.

Если обе части равенства, содержащего одну или несколько букв, имеют одинаковую численную величину не при всяких численных значениях этих букв, то оно называется уравнением, а числа, обозначенные этими буквами, называются неизвестными (числами) уравнения. Эти буквы обыкновенно берутся из последних букв латинского алфавита (x, y, z,...). Равенство, написанное нами сейчас согласно условию задачи, есть уравнение с одним неизвестным x.

Очевидно, что наша задача будет решена, если мы решим уравнение:

$$180 (x - 2) = 900,$$

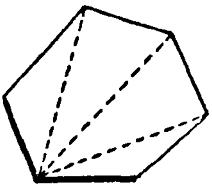
т. е. если мы найдем, какое число надо подставить вместо x, чтобы произведение $180 (x - 2)$ сделалось равным числу 900; другими словами, какое число надо подставить вместо x, чтобы уравнение обратилось в очевидное тождество ($900 = 900$). Для этого преобразуем уравнение таким образом: разделим обе его части на 180, от чего равенство не нарушится. Тогда в левой части мы получим $x - 2$[2]), а в правой — число 5. Значит:

$$x - 2 = 5.$$

Теперь приложим к обеим частям полученного уравнения по 2, отчего равенство опять-таки не нарушится. Тогда в левой

---

[1]) Из геометрии известно, что во всяком выпуклом многоугольнике сумма внутренних углов равна $2d$ (двум прямым углам), повторенным столько раз, сколько в многоугольнике сторон без двух. Так, как видно из чертежа 9, сумма внутренних углов 6 угольника равна $2d$, повторенным 4 раза ($4 = 6 - 2$).



Черт. 9.

[2]) В произведении $180 (x - 2)$ число 180 есть множимое, а $x - 2$ множитель; если же мы разделим произведение на множимое, то получим множитель.

части мы получим $x-2+2$, т. е. x, а в правой части будет $5+2$, т. е. 7. Значит

$$x=7.$$

И, действительно, при $x=7$ левая часть уравнения будет $180(7-2)$, т. е. $180\cdot5$, что составит 900; и уравнение обратится в очевидное тождество: $900=900$. Таким образом, искомый многоугольник должен быть семиугольник [1]).

Число 7, найденное нами для x, называется корнем уравнения или его решением; о таком числе принято говорить, что оно удовлетворяет уравнению, т. е. обращает его в очевидное тождество.

Найти корень уравнения — значит решить уравнение.

38. Примеры решения других уравнений. а) $x+7=9$. Отняв от обеих частей уравнения по 7, найдем: $x=2$.

б) $15=18-x$. Прибавив к обеим частям по x, получим $15+x=18$. Теперь отнимем по 15, тогда найдем: $x=3$.

в) $4x=42-2x$. Прибавив по $2x$, получим $6x=42$. Разделив обе части на 6, найдем: $x=7$.

г) $3x=5x-40$; $3x+40=5x$; $40=5x-3x=2x$; $20=x$; $x=20$.

д) $\frac{3x}{5}-7=2$. Прибавим по 7; получим $\frac{3x}{5}=9$.

Умножим обе части на 5; $3x=45$; разделим на 3; $x=15$.

39. Два основные свойства уравнения. Из приведенных примеров видно, что при решении уравнений можно пользоваться следующими двумя свойствами [2]):

а) *К обеим частям уравнения можно прибавить, или от них отнять, по одному и тому же числу.*

б) *Обе части уравнения можно умножить или разделить на одно и то же число.*

40. Члены уравнения. Условимся называть членами уравнения те числа (или те выражения), которые стоят в уравнении со знаком $+$, или со знаком $-$, или совсем без знака. Так, в уравнении $4x-9=x+9$ в левой части есть два члена: $4x$ и -9, и в правой части также два члена: x и $+9$. Если перед членами не стоит никакого знака, то мы условимся подразумевать перед такими членами знак $+$. Так, в нашем уравнении в левой части есть член $4x$, перед которым можно подразумевать знак $+$; равным образом и перед членом x в правой части.

---

[1]) Заметим, что наше уравнение можно было бы решить, основываясь не на свойствах равенства, а на свойствах действий. Так, заметив, что в уравнении $180(x-2)=900$ число 180 есть множимое, число $x-2$ множитель, а 900 произведение, мы можем найти множитель: он равен произведению, деленному на множимое, т. е. равен 900:180, что составляет 5. Тогда получим: $x-2=5$. Теперь видим, что x есть уменьшаемое, 2 вычитаемое, а 5 остаток. Но уменьшаемое равно вычитаемому, сложенному с остатком, значит: $x=2+5=7$.

[2]) Позже мы ознакомимся с этими свойствами более подробно (см §§ 120—124).

Заметим, что надо различать выражения: „члены уравнения“ и „части уравнения“; в каждом уравнении есть только 2 части (левая и правая), тогда как членов может быть в каждой части несколько.

41. Перенесение членов уравнения. Полезно теперь же заметить, что при решении уравнений мы можем перенести любой член уравнения из одной части уравнения в другую часть, только *переменив перед таким членом знак на противоположный*. Так, решая уравнение:

$$4x-9=x+9,$$

мы прибавили к обеим частям его по 9; от этого в левой части член -9 уничтожился, а в правой части получилось $x+9+9$. Таким образом член -9 из левой части перешел в правую, но знак его переменился из $-$ на $+$. После этого перенесения уравнение сделалось таким:

$$4x=x+9+9.$$

Теперь мы отнимаем от обеих частей уравнения по x; от этого в правой части член x уничтожается, а в левой получается $4x-x$, и уравнение делается:

$$4x-x=9+9.$$

Таким образом, член x перешел из правой части в левую, но знак его при этом переменился из подразумеваемого $+$ на $-$[1].

---

[1] Перенесение членов уравнения из одной части в другую послужило причиной введения слова „алгебра“. Это слово в первый раз встречается в сочинении арабского астронома **Мухаммеда Альхуаризми** (жившего в IX веке). Сочинение его было озаглавлено „**Альджебр-уальмукабала**“, что означает: „восстановление и противоположение“. Под „восстановлением“ разумелось уничтожение в уравнениях членов, перед которыми стоит знак $-$, посредством прибавления к обеим частям уравнения одного и того же числа, равного вычитаемому члену; а под „противоположением“ разумелось уничтожение членов, перед которыми стоит знак $+$, посредством отнятия от обеих частей уравнения одного и того же числа, равного уничтожаемому члену.

Поступая так, мы всегда можем перенести все члены, содержащие неизвестное, в одну часть уравнения (напр. в левую), а все остальные члены перенести в другую часть уравнения. Так, в нашем примере мы получим: $4x - x = 9 + 9$, т. е. $3x = 18$ и, следовательно, $x = 6$.

Замечания. 1) Введение в алгебру отрицательных чисел позволяет нам, перенося члены уравнения из одной его части в другую, не стесняться вычитанием бо́льшего числа из меньшего. Напр., в уравнении:

$$4x + 10 = 9x - 15,$$

мы можем член $9x$ перенести в левую часть, а член $+10$ в правую:

$$4x - 9x = -15 - 10, \quad \text{т. е.} \quad -5x = -25.$$

Но если $-5x = -25$, то $5x = 25$ (если два отрицательных числа равны между собой, то их абсолютные величины должны быть равны)[1], и, следовательно, $x = 5$.

Можем и не освобождаться от знаков $-$, а прямо разделить обе части уравнения на -5:

$$\frac{-5x}{-5} = \frac{-25}{-5}; \quad x = 5.$$

2) Нет надобности переносить все члены, содержащие неизвестное, непременно в левую часть уравнения; их можно перенести и в правую часть, а известные члены в левую; напр., во взятом нами примере мы можем перенести $4x$ вправо, а -15 влево:

$10 + 15 = 9x - 4x$; $25 = 5x$; $5 = x$; следовательно, $x = 5$.

---

[1] Можно также сказать: умножим обе части равенства $-5x = -25$ на -1; тогда получим: $5x = 25$.

ОТДЕЛ ВТОРОЙ.

ТОЖДЕСТВЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

(ПЕРВЫЕ ЧЕТЫРЕ АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ).

Глава первая.

Многочлен и одночлен.

42. Многочлен и одночлен. Алгебраическое выражение, составленное из нескольких других выражений, соединенных между собою знаками + или —, называется многочленом. Таково, напр., выражение:

$$ab - a + b^2 - 10 + \frac{a-b}{\;}.$$

Отдельные выражения, от соединения которых знаками + или — получился многочлен, называются его членами. Обыкновенно члены многочлена рассматриваются вместе с теми знаками, которые стоят перед ними; напр., говорят: член $-a$, член $+b^2$ и т. п. Перед первым членом, если перед ним не поставлено никакого знака, можно подразумевать знак +; так, в нашем примере первый член есть ab или $+ab$.

Выражение, состоящее только из одного члена, называется одночленом, из двух членов — двучленом, из трех — трехчленом и т. п. Одночлен представляет собой или отдельное число, выраженное буквой или цифрами (напр. $-a$, $+10$), или произведение (напр. ab), или частное $\left(\text{напр. } \frac{a-b}{2}\right)$, или степень (напр. b^2); но *одночлен не должен представлять собою ни сумму, ни разность*, так как в противном случае это был бы двучлен, трехчлен, вообще многочлен.

Если одночлен представляет собою частное, то он называется дробным одночленом; все другие одночлены называются целыми. Так, в нашем примере одночлен $\frac{a-b}{2}$ есть дробный, а все остальные члены многочлена целые. Так как в начале алгебры мы будем говорить только о целых одночленах, то для краткости мы будем их называть просто „одночленами“.

Если все члены многочлена целые, то он также называется целым.

43. Коэффициент. Положим, дано произведение:

$$a\,3ab\,(-2),$$

в котором некоторые сомножители выражены цифрами, другие — буквами. Такие произведения можно преобразовать (пользуясь сочетательным и переместительным свойствами умножения), соединив в одну группу все сомножители, выраженные цифрами, в другую группу — все сомножители, выраженные буквою a, и т. д.:

$$3\cdot(-2)\,(aa)\,b,$$

что можно написать короче: $-6a^2b$. Подобно этому:

$$-10axx\,(-2) = +20ax^2, \text{ и т. п.}$$

Выраженный цифрами сомножитель, поставленный впереди буквенных сомножителей, называется коэффициентом одночлена. Так, в одночлене $-6a^2b$ число -6 есть коэффициент[1].

Заметим, что если коэффициент есть целое положительное число, то он означает, сколько раз повторяется слагаемым то буквенное выражение, к которому он относится; так, $3ab = 3\,(ab) = (ab)\cdot 3 = ab + ab + ab$. Если коэффициент есть дробь, то он выражает, какая дробь берется от численной величины буквенного выражения. Так: $^2/_3\,ax = ax\cdot{}^2/_3$, а умножить ax на $^2/_3$ — значит взять $^2/_3$ от числа ax.

---

[1] Иногда некоторым буквенным сомножителям придают особое значение, отличающее их от остальных. Такие сомножители обыкновенно пишутся в конце произведения и обозначаются последними буквами алфавита (x, y, z); тогда коэффициентом при них называют произведение всех остальных сомножителей. Так, положим, что в одночлене $+20ax^2$ буква x означает неизвестное уравнения, а буква a — какое-нибудь данное число, тогда произведение $+20a$ может быть названо коэффициентом при x^2.

44. Свойства многочлена. Всякий многочлен можно рассматривать как алгебраическую сумму его членов. Напр., многочлен

$$2a-b+c$$

есть сумма: $2a+(-b)+(+c)$, так как выражение $+(-b)$ равносильно выражению $-b$ и выражение $+(+c)$ означает то же, что и $+c$. Вследствие этого все свойства суммы относительных чисел (§ 25) принадлежат также и многочлену. Напомним главнейшие из этих свойств:

а) Переместительное свойство: *численная величина многочлена не изменяется при перемещении его членов* (с их знаками).

Положим, напр., мы находим численную величину многочлена

$$2a^2-ab+b^2-\frac{1}{2}a$$

при $a=-4$ и $b=-3$. Для этого предварительно вычислим каждый член отдельно:

$$2a^2=2(-4)^2=2(-4)(-4)=32;-ab=-(-4)(-3)=-12;$$

$$b^2=(-3)^2=(-3)(-3)=+9;\ -\frac{1}{2}a=-\frac{1}{2}(-4)=+2.$$

Теперь сложим все полученные числа или в той последовательности, в какой написаны члены многочлена:

$$32-12+9+2=31,$$

или в каком-нибудь ином порядке,— всегда получим одно и то же число 31.

б) Сочетательное свойство: *численная величина многочлена не изменится, если какие-либо его члены мы заменим их алгебраической суммой.*

Так, если во взятом сейчас многочлене мы заменим члены $-ab$, $+b^2$ и $-\frac{1}{2}a$ их алгебраической суммою, т. е. возьмем этот многочлен в таком виде:

$$2a^2+\left(-ab+b^2-\frac{1}{2}a\right),$$

то при $a=-4$ и $b=-3$ получим:

$$32+(-12+9+2)=32+(-1)=31,$$

т. е. получим то же самое число 31, которое получили прежде.

Заметим еще следующее важное свойство многочлена:

в) *Если перед каждым членом многочлена переменим знак на противоположный, то численная величина многочлена изменит также знак на противоположный, а абсолютная величина ее не изменится.*

Напр., численная величина многочлена $2a^2-ab+b^2-\frac{1}{2}a$ при $a=-4$ и $b=-3$ равна, как мы видели, 31, а численная величина многочлена $-2a^2+ab-b^2+\frac{1}{2}a$ при тех же значениях букв равна -31.

45. Приведение подобных членов. Иногда в многочлене встречаются такие члены, которые отличаются друг от друга только коэффициентами, или знаками, или даже и совсем не отличаются; такие члены называются подобными. Напр., в многочлене

$$\underline{4a}-\underline{\underline{3x}}+\underline{0{,}5a}+\underline{\underline{8x}}+3ax-\underline{\underline{2x}}$$

первый член подобен третьему (они подчеркнуты одной чертой), второй член подобен четвертому и шестому (подчеркнуты двумя чертами), а пятый член не имеет себе подобных.

Если в многочлене встречаются подобные между собой члены, то их можно соединить в один член. Так, в приведенном сейчас примере мы можем (основываясь на сочетательном свойстве многочлена) соединить члены в такие группы:

$$(4a+0{,}5a)+(-3x+8x-2x)+3ax.$$

Но очевидно, что 4 каких-нибудь числа да 0,5 такого же числа составляют 4,5 этого же числа. Значит, $4a+0{,}5a=4{,}5a$. Равным образом $-3x+8x=5x$ и $5x-2x=3x$. Значит, многочлен можно изобразить так:

$$4{,}5a+3x+3ax.$$

Заметим, что соединение всех подобных между собою членов многочлена в один член принято называть приведением подобных членов многочлена.

Замечание. Два подобных члена с одинаковыми коэффициентами, но с разными знаками взаимно уничтожаются: таковы, напр., члены $+2a$ и $-2a$, или $-\frac{1}{2}x^2$ и $+\frac{1}{2}x^2$.

Примеры.

1) $a+\underline{5mx}-\underline{2mx}+\underline{7mx}-\underline{8mx}=a+2mx.$

2) $\underline{4ax}+b^2-\underline{7ax}-\underline{3ax}+\underline{2ax}=-4ax+b^2=b^2-4ax.$

3) $\underline{4a^2b^3}-\underline{\underline{3ab}}+\underline{0{,}5a^2b^3}+3a^2c+\underline{\underline{8ab}}=4{,}5a^2b^3+5ab+3a^2c.$

Глава вторая.

Алгебраическое сложение и вычитание.

46. Что представляют собою „алгебраические действия“.

В арифметике действия производятся над числами, и в результате получается одно новое число. В алгебре действия производятся не над числами, а над алгебраическими выражениями, и в результате получается новое алгебраическое выражение. Напр., умножить одночлен $3a$ на одночлен $2a$ — значит, во-первых, указать умножение принятыми знаками:

$$(3a)\ (2a)$$

и, во-вторых, преобразовать, если возможно, полученное алгебраическое выражение в другое, более простое. В нашем примере преобразование можно выполнить, рассуждая так: чтобы умножить какое-нибудь число на произведение $2\cdot a$, можно умножить это число сначала на 2, а потом результат умножить на a. Значит:

$$(3a)(2a)=(3a)\,2a.$$

В последнем выражении мы можем скобки отбросить, так как от этого смысл выражения не изменяется; тогда получим $3a2a$. Теперь, пользуясь сочетательным свойством умножения, сгруппируем сомножители так: $(3\cdot 2)(aa)$, что, очевидно, составляет $6a^2$.

Какое бы число буква a ни означала, численная величина выражения $(3a)(2a)$ всегда равна численной величине выражения $6a^2$, т. е. эти выражения **тождественны**.

Таким образом, алгебраическое действие в нашем примере умножения состоит, во-первых, в указании этого действия принятыми в алгебре знаками и, во-вторых, в преобразовании, если возможно, полученного алгебраического выражения в другое, тождественное ему.

47. Сложение одночленов. Пусть требуется сложить несколько одночленов: $3a, -5b, +0{,}2a, -7b$ и c. Их сумма выразится так:

$$3a+(-5b)+(+0{,}2a)+(-7b)+c.$$

Но выражения: $+(-5b)$, $+(+0{,}2a)$ и $+(-7b)$ равносильны выражениям: $-5b$, $+0{,}2a$ и $-7b$; поэтому сумму данных одночленов можно переписать проще так:

$$\underline{3a}-\underline{\underline{5b}}+\underline{0{,}2a}-\underline{\underline{7b}}+c,$$

что после приведения подобных членов даст: $3{,}2a-12b+c$. Значит, *чтобы сложить несколько одночленов, достаточно написать их один за другим с их знаками и сделать приведение подобных членов.*

48. Сложение многочленов. Пусть требуется к какому-нибудь числу или алгебраическому выражению m прибавить многочлен $a-b+c$. Искомую сумму можно выразить так:

$$m+(a-b+c).$$

Чтобы преобразовать это выражение, примем во внимание, что многочлен $a-b+c$ представляет собой сумму $a+(-b)+c$, а, чтобы прибавить сумму, можно прибавить каждое слагаемое одно за другим; поэтому:

$$m+(a-b+c)=m+a+(-b)+c.$$

Но прибавить $-b$ все равно, что вычесть b; поэтому:

$$m+(a-b+c)=m+a-b+c.$$

Правило. *Чтобы к какому-нибудь алгебраическому выражению прибавить многочлен, надо приписать к этому выражению все члены многочлена один за другим с их знаками* (причем перед первым членом многочлена, если перед ним не стоит никакого знака, надо подразумевать знак $+$) *и сделать приведение подобных членов, если они окажутся.*

Пример

$$(3a^2-5ab+b^2)+(4ab-b^2+7a^2).$$

Первое слагаемое, которое мы обозначали сейчас одной буквой m, дано в этом примере в виде многочлена $3a^2-5ab+b^2$. Применяя указанное правило, найдем:

$$3a^2-5ab+b^2+(4ab-b^2+7a^2)=3a^2-5ab+b^2+4ab-b^2+7a^2=$$
$$=10a^2-ab.$$

Если данные для сложения многочлены содержат подобные члены (как в нашем примере), то слагаемые полезно писать одно под другим так, чтобы подобные члены стояли под подобными:

$$\begin{array}{r} + \begin{array}{l} 3a^2-5ab+b^2 \\ 7a^2+4ab-b^2 \end{array} \\ \hline 10a^2-ab. \end{array}$$

49. Вычитание одночленов. Пусть требуется из одночлена $10ax$ вычесть одночлен $-3ax$. Искомая разность выразится так:

$$10ax-(-3ax).$$

Согласно правилу вычитания, вычитание $-3ax$ можно заменить прибавлением числа, противоположного числу $-3ax$. Такое число есть $+3ax$, поэтому:

$$10ax-(-3ax)=10ax+(+3ax)=10ax+3ax=13ax.$$

Значит, *чтобы вычесть одночлен, достаточно приписать его к уменьшаемому с противоположным знаком (и сделать приведение подобных членов, если они окажутся).*

50. Вычитание многочленов. Пусть требуется из какого-нибудь числа или алгебраического выражения m вычесть многочлен $a-b+c$, что можно обозначить так:

$$m-(a-b+c).$$

Для этого, согласно правилу вычитания (§ 21), достаточно прибавить к m число, противоположное числу $a-b+c$. Такое число есть $-a+b-c$ (§ 44, в); значит:

$$m-(a-b+c)=m+(-a+b-c).$$

Применяя теперь правило сложения многочленов, получим:

$$m-(a-b+c)=m-a+b-c.$$

Значит, *чтобы из какого-нибудь алгебраического выражения вычесть многочлен, достаточно к этому выражению приписать все члены вычитаемого многочлена с противоположными знаками (и сделать приведение).*

Если требуется вычесть из одного многочлена другой многочлен и в этих многочленах имеются подобные члены, то вычитаемый многочлен полезно писать под уменьшаемым, переменяя знаки у вычитаемого многочлена на противоположные, и так, чтобы подобные члены стояли под подобными. Напр., вычитание $(7a^2-2ab+b^2)-(5a^2+4ab-2b^2)$ лучше всего расположить так:

$$\begin{array}{r} 7a^2-2ab+b^2 \\ \underline{\pm 5a^2 \pm 4ab \mp 2b^2} \\ 2a^2-6ab+3b^2 \end{array}$$

(в вычитаемом многочлене верхние знаки поставлены те, какие были заданы, а внизу они переменены на противоположные).

51. Раскрытие скобок, перед которыми стоит знак + или —. Пусть в выражении

$$2a+(a-3b+c)-(2a-b+2c)$$

требуется раскрыть скобки. Это надо понимать так, что требуется над многочленами, стоящими внутри скобок, произвести те действия, которые указаны знаками, стоящими перед скобками. В нашем примере перед первыми скобками стоит знак +, перед вторыми знак —. Произведя сложение и вычитание по данным нами правилам, получим выражение без скобок:

$$2a+a-3b+c-2a+b-2c=a-2b-c.$$

Таким образом, мы должны помнить, что, *раскрывая скобки, перед которыми стоит знак +, мы не должны изменять знаки внутри скобок, а раскрывая скобки, перед которыми стоит знак —, мы должны перед всеми членами, стоящими внутри скобок, переменить знаки на противоположные.*

Пусть еще требуется раскрыть скобки в выражении:

$$10p-[3p+(5p-10)-4].$$

Для этого всего удобнее раскрыть сначала внутренние скобки, а потом внешние:

$$10p-[3p+5p-10-4]=10p-3p-5p+10+4=2p+14.$$

52. Заключение в скобки части многочлена. Для преобразования многочлена иногда бывает полезно заключить в скобки совокупность некоторых его членов, причем перед скобками иногда желательно поставить $+$, т. е. изобразить многочлен в виде суммы, а иногда знак $-$, т.-е. изобразить многочлен в виде разности. Пусть, напр., в многочлене $a+b-c$ мы желаем заключить в скобки два последних члена, поставив перед скобками знак $+$. Тогда пишем так:

$$a+b-c=a+(b-c),$$

т. е. внутри скобок оставляем те же знаки, какие были в данном многочлене. Что такое преобразование верно, убедимся, если раскроем скобки по правилу сложения; тогда получим снова данный многочлен.

Пусть в том же многочлене требуется заключить в скобки два последние числа, поставив перед скобками знак минус. Тогда напишем так:

$$a+b-c=a-(-b+c)=a-(c-b),$$

т. е. внутри скобок перед всеми членами переменяем знаки на противоположные. Что такое преобразование верно, убедимся, если раскроем скобки по правилу вычитания; тогда получим снова данный многочлен.

Замечание. Можно и весь многочлен заключить в скобки, поставив перед ними знак $+$ или $-$. Напр., можно написать:

$$a-b+c=+(a-b+c) \text{ и } a-b+c=-(-a+b-c).$$

Глава третья.

Алгебраическое умножение.

53. Умножение степеней одного и того же числа. Пусть надо умножить a^3 на a^2, что можно обозначить так: a^3a^2, или подробнее: $(aaa)(aa)$. Здесь произведение aaa умножается на другое произведение aa. Но чтобы умножить какое-нибудь число на произведение, можно умножить это число на первый сомножитель, полученный результат умножить на второй сомножитель, и т. д. (§ 35,3); поэтому:

$$a^3a^2=(aaa)(aa)=(aaa)aa,$$

что может быть написано и без скобок, так как порядок действий остается и без скобок такой же, какой указан скобками:

$$a^3a^2 = aaaaa = a^5.$$

Значит, *при умножении степеней одного и того же числа показатели их складываются.*

Таким образом: $x^3x = x^4$, $m^2m^3 = m^5$, $y^2yy^3 = y^6$, и т. д.

54. Умножение одночленов. Мы уже говорили раньше (§ 46), как можно преобразовать произведение одночленов $(3a)(2a)$ в одночлен $6a^2$. Повторим теперь сказанное тогда на другом примере. Пусть дано умножить:

$$3ax^2(-5abx)\;^{1)}.$$

Так как одночлен $-5abx$ есть произведение, то достаточно умножить множимое на первый сомножитель -5, результат умножить на второй сомножитель a, и т. д. Значит:

$$3ax^2(-5abx) = 3ax^2(-5)abx.$$

В этом произведении, пользуясь сочетательным свойством умножения, сгруппируем сомножители в такие группы:

$$(+3)(-5)\ (aa)\ b\ (x^2x).$$

Произведя умножение в каждой группе, получим:

$$-15a^2bx^3.$$

Значит, *чтобы умножить одночлен на одночлен, надо перемножить их коэффициенты, сложить показатели одинаковых букв, а те буквы, которые входят только во множимое или только во множитель, перенести в произведение с их показателями.*

Примеры.

1) $0{,}7a^3x(3a^4x^2y^2) = 2{,}1a^7x^3y^2$.

2) $\left(\frac{1}{2}mx^3\right)^2 = \frac{1}{2}mx^3\left(\frac{1}{2}mx^3\right) = \frac{1}{4}m^2x^6$.

3) $-3{,}5x^2y\left(\frac{3}{4}x^3\right) = -\frac{21}{8}x^5y$.

---

1) Скобки в этом выражении означают, что число, равное $3ax^2$, надо умножить на число, равное $-5abx$. Если бы мы написали это выражение без скобок: $3ax^2-5abx$, то это значило бы, что из числа, равного $3ax^2$, вычитается число, равное $5abx$.

55. Умножение многочлена на одночлен. Пусть дано умножить многочлен $a+b-c$ на одночлен m, что можно выразить так:

$$(a+b-c)\,m$$

Многочлен $a+b-c$ есть сумма относительных чисел $a+b+(-c)$. Но, чтобы умножить сумму, можно умножить каждое слагаемое отдельно и результаты сложить (распределительное свойство, § 34, д); значит:

$$(a+b-c)\,m=[\,a+b+(-c)\,]\,m=am+bm+(-c)\,m.$$

Но

$$(-c)\,m=-cm \quad \text{и} \quad +(-cm)=-cm;$$

поэтому

$$(a+b-c)\,m=am+bm-cm.$$

Правило. *Чтобы умножить многочлен на одночлен, надо умножить на этот одночлен каждый член многочлена и полученные произведения сложить.*

Так как произведение не изменяется от перестановки мест сомножителей, то это правило применимо также и к умножению одночлена на многочлен; таким образом:

$$m\,(a+b-c)=ma+mb-mc.$$

Примеры.

1) $(3x^2-2ax+5a^2)\,(-4ax)$.

Здесь умножение членов многочлена на данный одночлен надо производить по правилу умножения одночленов, принимая во внимание также и правило знаков: одинаковые знаки при умножении дают $+$, а разные знаки дают $-$. Умножаем отдельно каждый член многочлена на одночлен:

$$(3x^2)\,(-4ax)=-12ax^3;\ (-2ax)\,(-4ax)=+8a^2x^2,$$
$$(+5a^2)\,(-4ax)=-20a^3x.$$

Теперь сложим полученные результаты:

$$-12ax^3+8a^2x^2-20a^3x.$$

2) $(a^2-ab+b^2)\,(3a)=a^2\,(3a)-(ab)\,(3a)+b^2\,(3a)=$
$=3a^3-3a^2b+3ab^2.$

3) $\left(7x^3+\frac{3}{4}ax-0{,}3\right)(2{,}1a^2x)=(7x^3)\,(2{,}1a^2x)+\left(\frac{3}{4}ax\right)(2{,}1a^2x)-$
$-0{,}3\,(2{,}1a^2x)=14{,}7a^2x^4+1{,}575a^3x^2-0{,}63a^2x.$

4) $2a\left(3a-4ax+\frac{1}{2}x^2\right)=6a^2-8a^2x+ax^2.$

56. Умножение многочлена на многочлен. Пусть требуется произвести умножение:

$$(a+b-c)(m-n)$$

Рассматривая множитель $m-n$ как одно число (как одночлен), применим правило умножения многочлена на одночлен:

$$a(m-n)+b(m-n)-c(m-n).$$

Рассматривая теперь выражение $m-n$ как многочлен (двучлен), применим правило умножения одночлена на многочлен:

$$(am-an)+(bm-bn)-(cm-cn).$$

Наконец, раскрыв скобки по правилам сложения и вычитания, окончательно найдем:

$$(a+b-c)\;(m-n)=am-an+bm-bn-cm+cn.$$

Правило. *Чтобы умножить многочлен на многочлен, надо умножить каждый член первого многочлена на каждый член второго многочлена и полученные произведения сложить.*

Конечно, при умножении членов первого многочлена на члены второго многочлена нужно руководствоваться правилами знаков: одинаковые знаки дают +, разные знаки —.

Пример. $(a^2-5ab+b^2-3)\;(a^3-3ab^2+b^3)$.

Умножим сначала все члены множимого на 1-й член множителя:

$$(a^2-5ab+b^2-3)\,a^3=a^5-5a^4b+a^3b^2-3a^3.$$

Затем умножим все члены множимого на 2-й член множителя:

$$(a^2-5ab+b^2-3)\;(-3ab^2)=-3a^3b^2+15a^2b^3-3ab^4+9ab^2.$$

Далее, умножим на третий член множителя:

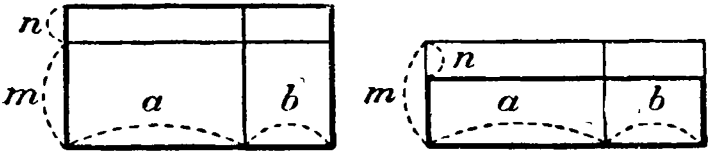
$$(a^2-5ab+b^2-3)\;(+b^3)=a^2b^3-5ab^4+b^5-3b^3.$$

Наконец, сложим все полученные произведения и сделаем приведение подобных членов; окончательный результат будет:

$$a^5-5a^4b-2a^3b^2-3a^3+10a^2b^3-8ab^4+9ab^2+b^5-3b^3.$$

Замечания. 1) Чтобы при умножении многочлена на многочлен не пропустить ни одного из произведений членов, полезно всегда держаться какого-нибудь одного порядка умножения; напр., как это мы сейчас делали, умножить сначала все члены множимого на 1-й член множителя, затем умножить все члены на 2-й член множителя, и т. д.

2) В применении к арифметическим числам правило умножения многочленов может быть наглядно истолковано геометрически. Возьмем, напр., 4 отрезка прямой a, b, m и n и построим два прямоугольника: один с основанием $a+b$ и высотою $m+n$, другой с основанием $a+b$ и высотою $m-n$. Площадь первого равна $(a+b)(m+n)$, а площадь второго будет $(a+b)(m-n)$. Из чертежей непосредственно видно, что первая площадь равна $am+bm+an+bn$, а вторая равна $am+bm-an-bn$.



Черт. 10.

Примеры.

1) $(a-b)(m-n-p)=am-bm-an+bn-ap+bp.$

2) $(x^2-y^2)(x+y)=x^3-xy^2+x^2y-y^3.$

3) $(3an+2n^2-4a^2)(n^2-5an)=3an^3+2n^4-4a^2n^2-15a^2n^2-$
$-10an^3+20a^3n=-7an^3+2n^4-19a^2n^2+20a^3n.$

4) $(2a^2-3)^2=(2a^2-3)\ (2a^2-3)=(2a^2)^2-3\ (2a^2)-(2a^2)\ 3+$
$+9=4a^4-6a^2-6a^2+9=4a^4-12a^2+9.$

57. Расположенный многочлен. Расположить многочлен по степеням какой-нибудь буквы — значит, если возможно, написать его члены в такой последовательности, чтобы показатели этой буквы увеличивались или уменьшались от первого члена к последнему. Так, многочлен $1+2x+3x^2-x^3$ расположен по возрастающим степеням буквы x. Тот же многочлен будет расположен по убывающим степеням буквы x, если члены его напишем в обратном порядке: $-x^3+3x^2+2x+1$.

Буква, по которой расположен многочлен, называется главной его буквой. Член, содержащий главную букву с наибольшим показателем, называется высшим членом многочлена; член, содержащий главную букву с наименьшим показателем или не содержащий ее вовсе, называется **низшим членом** многочлена.

58. Умножение расположенных многочленов всего удобнее производить так, как будет указано на следующем примере.

Умножить

$$3x-5+7x^2-x^3 \text{ на } 2-8x^2+x.$$

Расположив оба многочлена по убывающим степеням буквы x, пишут множитель под множимым и под ними проводят черту:

$$\begin{array}{rrrrrr}
 & & -x^3 & +7x^2 & +3x & -5 \\
 & & & -8x^2 & +x & +2 \\
\hline
8x^5 & -56x^4 & -24x^3 & +40x^2 & & \\
 & -x^4 & +7x^3 & +3x^2 & -5x & \\
 & & -2x^3 & +14x^2 & +6x & -10 \\
\hline
8x^5 & -57x^4 & -19x^3 & +57x^2 & +x & -10
\end{array}.$$

Умножают все члены множимого на 1-й член множителя (на $-8x^2$) и полученное произведение пишут под чертою. Умножают затем все члены множимого на 2-й член множителя (на $+x$) и полученное второе произведение пишут под первым так, чтобы подобные члены стояли под подобными. Так же поступают и далее. Под последним произведением (на $+2$) проводят черту, под которою пишут полное произведение, складывая все остальные произведения.

Можно также оба многочлена расположить по возрастающим степеням главной буквы и затем производить умножение в том порядке, как было сейчас указано.

59. Высший и низший члены произведения. Из рассмотрения этих примеров следует:

Высший член произведения равен произведению высшего члена множимого на высший член множителя.

Низший член произведения равен произведению низшего члена множимого на низший член множителя.

Остальные члены произведения могут получиться от соединения нескольких подобных членов в один. Может даже случиться, что в произведении, после приведения подобных членов, все члены уничтожатся, кроме первого и последнего (высшего и низшего), как это видно на следующем примере:

$$\begin{array}{r}
x^4 + ax^3 + a^2x^2 + a^3x + a^4 \\
x - a \\
\hline
x^5 + ax^4 + a^2x^3 + a^3x^2 + a^4x \qquad \\
- ax^4 - a^2x^3 - a^3x^2 - a^4x - a^5 \\
\hline
x^5 \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad - a^5 = x^5 - a^5.
\end{array}$$

60. Число членов произведения. Пусть во множимом будет пять членов, а во множителе три члена. Умножив каждый член множимого на 1-й член множителя, мы получим 5 членов произведения; умножив затем каждый член множимого на 2-й член множителя, мы получим еще 5 членов произведения и т. д.; значит, всех членов в произведении окажется $5 \cdot 3$, т. е. 15. Вообще, *число членов произведения, до соединения в нем подобных членов, равно произведению числа членов множимого на число членов множителя.*

Так как высший и низший члены произведения не могут иметь себе подобных членов, а все прочие члены могут уничтожиться, *то наименьшее число членов произведения после приведения в нем подобных членов равно 2.*

61. Некоторые формулы умножения двучленов. Полезно запомнить следующие формулы умножения двучленов:

а) $(\mathbf{a}+\mathbf{b})^2 = (a+b)(a+b) = a^2 + ab + ab + b^2 = \mathbf{a}^2 + 2\mathbf{ab} + \mathbf{b}^2$.

Напр.: $17^2 = (10 + 7)^2 = 10^2 + 2 \cdot 10 \cdot 7 + 7^2 = 100 + 140 + 49 = 289$.

Таким образом, *квадрат суммы двух чисел равен квадрату первого числа, плюс удвоенное произведение первого числа на второе, плюс квадрат второго числа.*

б) $(\mathbf{a}-\mathbf{b})^2 = (a-b)(a-b) = a^2 - ab - ab + b^2 = \mathbf{a}^2 - 2\mathbf{ab} + \mathbf{b}^2$.

Напр.: $19^2 = (20-1)^2 = 20^2 - 2 \cdot 20 \cdot 1 + 1^2 = 400 - 40 + 1 = 361$.

Таким образом, *квадрат разности двух чисел равен квадрату первого числа, минус удвоенное произведение первого числа на второе, плюс квадрат второго числа.*

Замечание. Полезно заметить, что возвышение в степень по отношению к сложению и вычитанию не обладает распределительным свойством; так, $(2+3)^2$ не равно 2^2+3^2, или $(8-6)^2$ не равно 8^2-6^2.

в) $(\mathbf{a}+\mathbf{b})(\mathbf{a}-\mathbf{b}) = a^2 + ab - ab + b^2 = \mathbf{a}^2 - \mathbf{b}^2$.

Напр.: $25 \cdot 15 = (20+5)(20-5) = 20^2 - 5^2 = 400 - 25 = 375$.

Таким образом, *произведение суммы двух чисел на их разность равно разности квадратов этих чисел.*

г) $(a+b)^3=(a+b)^2(a+b)=(a^2+2ab+b^2)(a+b)=a^3+2a^2b+ab^2+$ $+a^2b+2ab^2+b^3=a^3+3a^2b+3ab^2+b^3$.

Напр.: $12^3=(10+2)^3=10^3+3\cdot10^2\cdot2+3\cdot10\cdot2^2+2^3=1000+600+120+$ $+8=1728$.

Таким образом, *куб суммы двух чисел равен кубу первого числа, плюс утроенное произведение квадрата первого числа на второе, плюс утроенное произведение первого числа на квадрат второго, плюс куб второго числа.*

д) $(a-b)^3=(a-b)^2(a-b)=(a^2-2ab+b^2)(a-b)=a^3-2a^2b+ab^2-$ $-a^2b+2ab^2-b^3=a^3-3a^2b+3ab^2-b^3$.

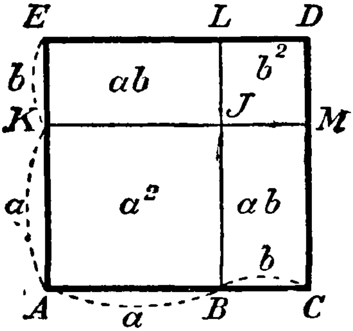
Напр., $19^3=(20-1)^3=20^3-3\cdot20^2\cdot1+3\cdot20\cdot1^2-1^3=8000-1200+60-$ $-1=6859$.

Таким образом, *куб разности двух чисел равен кубу первого числа, минус утроенное произведение квадрата первого числа на второе, плюс утроенное произведение первого числа на квадрат второго, минус куб второго числа.*

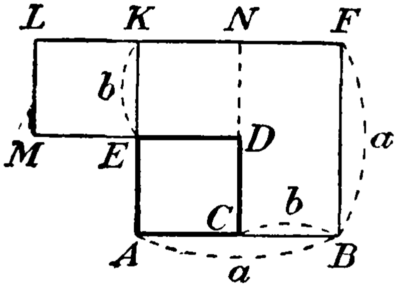
62. Геометрическое истолкование некоторых из этих формул.

а) Отложим отрезок прямой $AB=a$ и к нему приложим отрезок $BC=b$ (черт. 11), затем построим квадраты: $ACDE$ и $ABJK$, которых площади будут равны $(a+b)^2$ и a^2. Продолжив прямые BJ и KJ до пересечения с ED и CD, мы разобьем больший квадрат на 4 части, которых площади будут: a^2, b^2, ab и ab. Значит:

$$(a+b)^2=a^2+ab+ab+b^2=a^2+2ab+b^2.$$



Черт. 11.



Черт. 12.

б) Отложим (черт. 12) $AB=a$ и из AB вычтем $BC=b$; затем построим квадраты $ACDE$, $ABFK$ и $KLME$, которых площади будут $(a-b)^2$, a^2 и b^2. Продолжив CD до точки N, мы получим: пл. $ACDE=$ пл. $ABFK+$ пл. $EKLM-$ пл. $CBFN-$ пл. $DNLM$.

Значит:

$$(a-b)^2=a^2+b^2-ab-ab=a^2-2ab+b^2.$$

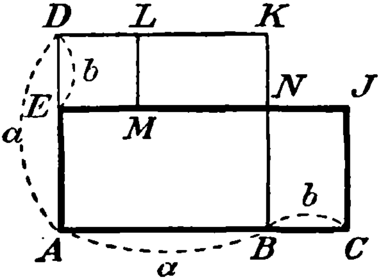
в) Отложив (черт. 13) $AB=a$, $BC=b$, $AD=a$ и $DE=b$, построим прямоугольник $ACJE$ и квадраты $ABKD$ и $DEML$. Тогда пл. $ACJE=$ пл. $ABKD+$ пл. $BCJN-$ пл. $DEML-$ пл. $LMNK$.

Но прямоугольники $BCJN$ и $LMNK$ равны, и потому их площади в написанном нами равенстве взаимно уничтожаются:

$$\text{пл. } ACJE = \text{пл. } ABKD - \text{пл. } DEML,$$

т. е.

$$(a+b)(a-b)=a^2-b^2.$$



Черт. 13.

63. Применения. При помощи указанных формул можно иногда производить умножение многочленов проще, чем обыкновенным путем. Приведем примеры:

1) $(4a^3-1)^2=(4a^3)^2-2(4a^3)\cdot 1+1^2=16a^6-8a^3+1.$

2) $(x+y)(y-x)=(y+x)(y-x)=y^2-x^2.$

3) $(x+y+1)(x-y+1)=[(x+1)+y][(x+1)-y]=$
$=(x+1)^2-y^2=x^2+2x+1-y^2.$

4) $(a-b+c)(a+b-c)=[a-(b-c)][a+(b-c)]=$
$=a^2-(b-c)^2=a^2-(b^2-2bc+c^2)=a^2-b^2+2bc-c^2.$

Глава четвертая.

Алгебраическое деление.

64. Деление степеней одного и того же числа. Пусть требуется разделить:

$$a^5:a^2.$$

Так как делимое должно равняться делителю, умноженному на частное, а при умножении показатели одинаковых букв складываются, то в искомом частном показатель буквы *a* должен быть такое число, которое, сложенное с 2, составляет 5; такое число равно разности $5-2$. Значит:

$$a^5:a^2=a^{5-2}=a^3.$$

Подобно этому найдем: $x^3:x^2=x$; $y^4:y=y^3$, и т. п.

Значит, *при делении степеней одного и того же числа показатель делителя вычитается из показателя делимого*[1].

65. Нулевой показатель. Если при делении степеней одного и того же числа показатель делителя окажется равным показателю делимого, то частное должно равняться 1; напр.: $a^3 : a^3 = 1$, потому что $a^3 = a^3 \cdot 1$. Условимся производить вычитание показателей и в этом случае; тогда в частном мы получим букву с нулевым показателем: $a^3 : a^3 = a^{3-3} = a^0$. Конечно, этот показатель не имеет того значения, которое мы придавали показателям ранее, так как нельзя повторить число сомножителем 0 раз. Мы условимся *под видом* a^0 *разуметь частное от деления одинаковых степеней буквы* a, и так как это частное равно 1, то мы будем принимать a^0 за 1.

66. Деление одночленов. Пусть дано разделить:

$$(12a^3b^2x) : (4a^2b^2).$$

Впрочем, ради краткости писания скобки в подобных обозначениях принято опускать. Согласно определению деления, частное, будучи умножено на делитель, должно составить делимое. Поэтому у искомого частного коэффициент должен быть $12 : 4$, т. е. 3; показатель у буквы a получится вычитанием из показателя этой буквы в делимом показателя той же буквы в делителе, буква b совсем не войдет в частное, или — что все равно — войдет в него с показателем 0, а буква x перейдет в частное со своим показателем.

Таким образом: $12a^3b^2x : 4a^2b^2 = 3ax$. Поверка: $3ax \cdot 4a^2b^2 = 12a^3b^2x$.

Правило. *Чтобы разделить одночлен на одночлен, надо коэффициент делимого разделить на коэффициент делителя, из показателей букв делимого вычесть показатели тех же букв делителя и перенести в частное, без изменения показателей, те буквы делимого, которых нет в делителе.*

Примеры.

1) $3m^3n^4x : 4m^2nx = \frac{3}{4}mn^3$.

2) $-ax^4y^3 : -\frac{5}{6}axy^2 = +\frac{6}{5}x^3y$.

3) $0{,}8ax^n : -0{,}02ax = 40x^{n-1}$.

---

[1] Если только число, степени которого делятся, не равно нулю. Так, нельзя написать: $0^m : 0^n = 0^{m-n}$, так как это равенство означало бы: $0 : 0 = 0$, тогда как частное $0 : 0$ может равняться любому числу (§ 33).

67. Признаки невозможности деления одночленов. Если частное от деления целых одночленов не может быть выражено точно целым одночленом, то говорят, что такое деление невозможно. Деление одночленов невозможно в двух случаях:

а) Когда в делителе есть буквы, которых нет в делимом. Напр., нельзя разделить $4ab^2$ на $2ax$, так как всякий одночлен, умноженный на $2ax$, дает произведение, содержащее букву x, а в нашем делимом такой буквы совсем нет.

б) Когда показатель какой-либо буквы в делителе больше показателя той же буквы в делимом.

Напр., деление $10a^3b^2 : 5ab^3$ невозможно, так как всякий одночлен, умноженный на $5ab^3$, дает в произведении такой одночлен, который содержит букву b с показателем 3 или с показателем, бо́льшим 3, тогда как в нашем делимом эта буква стоит с показателем 2.

Когда один одночлен не делится на другой одночлен, то частное может быть только указано посредством знаков деления; так, частное от деления $4a^2b : 2ac$ может быть указано

$$\text{или так: } 4a^2b : 2ac, \quad \text{или так: } \frac{4a^2b}{2ac}.$$

68. Деление многочлена на одночлен. Пусть требуется разделить многочлен $a+b-c$ на одночлен m, что можно выразить так:

$$(a+b-c) : m, \quad \text{или} \quad \frac{a+b-c}{m}.$$

Многочлен $a+b-c$ есть алгебраическая сумма, а чтобы разделить алгебраическую сумму на какое-нибудь число, можно разделить на это число каждое слагаемое отдельно (§ 34, д); поэтому:

$$\frac{a+b-c}{m} = \frac{a}{m} + \frac{b}{m} - \frac{c}{m}.$$

В этом можно убедиться и поверкою: умножив многочлен $\frac{a}{m} + \frac{b}{m} - \frac{c}{m}$ на делитель m, мы получим делимое $a+b-c$.

Правило. *Чтобы разделить многочлен на одночлен, надо разделить на этот одночлен каждый член многочлена и полученные частные сложить.*

Конечно, деление членов многочлена на одночлен производят по правилу деления одночленов.

Примеры.

1) $(20a^3 - 8a^2 - a) : 4a = 5a^2 - 2a - \frac{1}{4}$.

2) $(4x^2 - 2x + 10) : 2x = 2x - 1 + \frac{5}{x}$

3) $\left(\frac{1}{2}x^3 - 0,3x^2 + 1\right) : 2x^2 = \frac{1}{4}x - 0,15 + \frac{1}{2x^2}$.

69. Деление одночлена на многочлен. Пусть требуется одночлен a разделить на многочлен $b + c - d$. Частное от такого деления не может быть выражено ни целым одночленом, ни целым многочленом, так как если допустим, что частное равно какому-нибудь целому одночлену или целому многочлену, то произведение этого частного на многочлен $b + c - d$ дало бы тоже многочлен, а не одночлен, как требуется делением. Частное от деления a на $b + c - d$ может быть только обозначено знаками деления:

$$a : (b + c - d), \text{ или } \frac{a}{b + c - d}.$$

70. Деление многочлена на многочлен. Частное от деления многочлена на многочлен только в редких случаях можно выразить в виде целого многочлена. Напр.:

$$(a^2 + 2ab + b^2) : (a + b) = a + b,$$

так как $(a + b)(a + b) = (a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$.

Вообще же подобные частные можно только обозначить знаком деления. Напр., частное от деления $a - b + c$ на $d - e$ выразится так:

$$\frac{a - b + c}{d - e}, \text{ или } (a - b + c) : (d - e).$$

Выразить частное в виде целого многочлена иногда удается тогда, когда оба многочлена расположены по степеням одной и той же буквы. Покажем, как это сделать, на следующем примере:

$$(5x^2 - 19x^3 + 17x + 6x^4 - 4) : (1 - 5x + 3x^2).$$

Напишем оба многочлена по убывающим степеням буквы x и расположим деление так, как оно располагается при делении целых чисел:

$$\begin{array}{lrl}
 & 6x^4 - 19x^3 + 5x^2 + 17x - 4 & \left|\underline{3x^2 - 5x + 1}\right. \\
 & \underline{\pm 6x^4 \mp 10x^3 \pm 2x^2} & \; 2x^2 - 3x - 4 \\
\text{1-й остаток} \ldots & -9x^3 + 3x^2 + 17x - 4 & \\
 & \underline{\mp 9x^3 \pm 15x^2 \mp 3x} & \\
\text{2-й остаток} \ldots\ldots & -12x^2 + 20x - 4 & \\
 & \underline{\mp 12x^2 \pm 20x \mp 4} & \\
\text{3-й остаток} & \ldots\ldots 0 &
\end{array}$$

Предположим, что искомое частное равно какому-нибудь многочлену и что члены этого многочлена расположены тоже по убывающим степеням буквы x.

Делимое должно равняться произведению делителя на частное. Из умножения расположенных многочленов известно (§ 58), что высший член произведения равен произведению высшего члена множимого на высший член множителя. В делимом высший член есть первый, в делителе и частном высшие члены тоже первые. Значит, 1-й член делимого ($6x^4$) должен быть произведением 1-го члена делителя ($3x^2$) на 1-й член частного. Отсюда следует: чтобы найти 1-й член частного, достаточно разделить 1-й член делимого на 1-й член делителя. Разделив, находим 1-й член частного $2x^2$. Пишем его под чертою в частном.

Умножим все члены делителя на 1-й член частного и полученное произведение вычтем из делимого. Для этого напишем его под делимым так, чтобы подобные члены стояли под подобными, и у всех членов вычитаемого переменим знаки на обратные. Получим после вычитания 1-й остаток. Если бы этот остаток оказался равным нулю, то это значило бы, что в частном никаких других членов, кроме найденного 1-го, нет, т. е. что частное есть одночлен. Если же, как в нашем примере, 1-й остаток не есть нуль, то будем рассуждать так.

Делимое есть произведение всех членов делителя на каждый член частного. Мы вычли из делимого произведение всех членов делителя на 1-й член частного; следовательно, в 1-м остатке заключается произведение всех членов делителя на 2-й, на 3-й и следующие члены частного. Высший член в остатке есть 1-й; высший член делителя тоже 1-й; высший член в частном (не считая 1-го) есть 2-й член. Значит, 1-й член остатка ($-9x^3$) должен равняться произведению 1-го члена делителя на 2-й член частного. Отсюда заключаем: чтобы найти 2-й член частного, достаточно разделить 1-й член 1-го остатка на 1-й член делителя. Разделив, находим 2-й член частного $-3x$. Пишем его в частном.

Умножим на 2-й член частного все члены делителя и полученное произведение вычтем из 1-го остатка. Получим 2-й остаток. Если этот остаток равен нулю, то деление окончено; если же, как в нашем примере, 2-й остаток не равен нулю, то будем рассуждать так.

2-й остаток есть произведение всех членов делителя на 3-й, на 4-й и следующие члены частного. Так как из этих членов частного высший есть 3-й, то, подобно предыдущему, 3-й член частного найдем, если 1-й член 2-го остатка разделим на 1-й член делителя. Разделив, находим -4. Умножив на -4 все члены делителя и вычтя произведение из остатка, получим 3-й остаток. В нашем примере этот остаток оказался нулем; это показывает, что в частном других членов, кроме найденных, не может быть. Если бы 3-й остаток был не 0, то подобно предыдущему, надо было бы делить 1-й член этого остатка на 1-й член делителя; от этого получился бы 4-й член частного, и т. д.

Можно было бы расположить делимое и делитель по возрастающим степеням одной и той же буквы и затем поступать так, как сейчас было сказано; при этом пришлось бы основываться на том, что низший член произведения равен произведению низшего члена множимого на низший член множителя.

71. Примеры.

а)
$$\begin{array}{r|l} 28x^4-13ax^3-26a^2x^2+15a^3x & 7x^2+2ax-5a^2 \\ \text{„}\quad -8ax^3+20a^2x^2 \qquad\qquad & \overline{4x^2-3ax} \\ \hline -21ax^3-6a^2x^2+15a^3x & \\ \text{„}\quad +6a^2x^2-15a^3x & \\ \hline 0 \qquad\qquad & \end{array}$$

Мы здесь не писали произведений 1-го члена делителя на 1-й, на 2-й и т. д. члены частного, потому что эти произведения всегда равны тем членам, под которыми они подписываются, и при вычитании всегда сокращаются. Обыкновенно так и делают. Кроме того, подписывая вычитаемые, мы писали их прямо с обратными знаками.

б)
$$\begin{array}{l|l}
x^3 - a^3 & x - a \\ \cline{2-2}
\text{„} + ax^2 & x^2 + ax + a^2 \\ \cline{1-1}
ax^2 - a^3 & \\
\text{„} + a^2x & \\ \cline{1-1}
a^2x - a^3 & \\
\text{„} + a^3 & \\ \cline{1-1}
\quad 0 &
\end{array}$$

в)
$$\begin{array}{l|l}
x^4 - a^4 & x - a \\ \cline{2-2}
\text{„} + ax^3 & x^3 + ax^2 + a^2x + a^3 \\ \cline{1-1}
ax^3 - a^4 & \\
\text{„} + a^2x^2 & \\ \cline{1-1}
a^2x^2 - a^4 & \\
\text{„} + a^3x & \\ \cline{1-1}
a^3x - a^4 & \\
\text{„} + a^4 & \\ \cline{1-1}
\quad 0 &
\end{array}$$

Подобным образом можем убедиться, что разности $x^5 - a^5$, $x^6 - a^6$... и вообще $x^m - a^m$ делятся без остатка на разность $x - a$, т. е. что *разность одинаковых степеней двух чисел делится на разность этих чисел без остатка.*

72. Признаки невозможности деления многочленов. Из описанного процесса видно, что деление многочлена на многочлен нельзя выполнить в следующих случаях:

а) *Если показатель главной буквы в высшем члене делимого меньше показателя той же буквы в высшем члене делителя,* потому что тогда нельзя получить высшего члена частного.

б) *Если показатель главной буквы в низшем члене делимого меньше показателя той же буквы в низшем члене делителя,* потому что тогда нельзя получить низшего члена частного.

в) Если показатели главной буквы в высшем и низшем членах делимого не меньше, соответственно, показателей этой буквы в высшем и низшем членах делителя, то еще нельзя сказать, чтобы деление было возможно. В этом случае, чтобы судить о возможности или невозможности деления, надо приступить к выполнению самого действия и продолжать его до тех пор, пока окончательно не убедимся в возможности или невозможности получить частное в виде многочлена.

При этом надо различать 2 случая:

I. Когда многочлены расположены по убывающим степеням главной буквы, то продолжают действие до тех пор, пока в остатке не получится 0 (тогда деление возможно и закончено), или пока не дойдут до такого остатка, 1-й член которого содержит главную букву с показателем меньшим, чем показатель 1-го члена делителя (тогда деление невозможно). Напр.:

$$\begin{array}{l|l}
10a^4 - 2a^3 \qquad + 3a + 4 & 2a^2 - 1 \\ \cline{2-2}
\text{„} \qquad + 5a^2 & 5a^2 - a + 5/2 \\ \cline{1-1}
\quad - 2a^3 + 5a^2 + 3a & \\
\qquad \text{„} \qquad - a & \\ \cline{1-1}
\qquad\quad 5a^2 + 2a + 4 & \\
\qquad\quad \text{„} \qquad + 5/2 & \\ \cline{1-1}
\qquad\qquad 2a + 6^1/_2 &
\end{array}$$

Деление невозможно, потому что мы дошли до такого остатка, у которого 1-й член не делится на 1-й член делителя.

II. Когда многочлены расположены по возрастающим степеням, то, сколько бы мы ни продолжали деление, никогда не получим такого остатка, у которого показатель 1-го члена был бы меньше показателя 1-го члена делителя, потому что при таком расположении показатели главной буквы в первых членах остатков идут увеличиваясь. Напр.:

$$
\begin{array}{l|l}
4+3a\qquad\qquad -2a^3+10a^4 & -1+2a^2 \\ \cline{2-2}
\text{„}\qquad +8a^2 & -4-3a-8a^2 \\ \cline{1-1}
\quad 3a+8a^2-2a^3 & \\
\quad \text{„}\qquad\quad +6a^3 & \\ \cline{1-1}
\qquad 8a^2+4a^3+10a^4 & \\
\qquad \text{„}\qquad\qquad +16a^4 & \\ \cline{1-1}
\qquad\qquad 4a^3+26a^4 &
\end{array}
$$

Продолжая действие дальше, мы получили бы в частном член $-4a^3$, но если бы возможно было получить целое частное (без остатка), то последний член его должен был бы быть $5a^2$ (от деления высшего члена делимого на высший член делителя); значит, деление невозможно.

Замечание. О делении многочленов изложено более подробно во 2-й части, § 390 и след.

Глава пятая.

Разложение на множители.

73. Предварительное замечание. Говоря об алгебраическом делении, мы указывали, что в некоторых случаях частное можно только обозначить знаком деления. Получаемые при этом выражения, вроде таких:

$$\frac{a}{b},\quad \frac{2x}{3a},\quad \frac{x^2-4x+y^2}{x+y} \text{ и т. п.,}$$

принято называть алгебраическими дробями по сходству этих выражений с арифметическими дробями.

Мы вскоре увидим, что алгебраические дроби, подобно арифметическим, могут быть иногда упрощены посредством сокращения (т. е. посредством деления) делимого и делителя на их общие множители, если таковые окажутся. Для того, чтобы такое сокращение возможно было производить без затруднения, надо научиться разлагать алгебраические выражения на множители (подобно тому, как в арифметике для сокращения дробей надо уметь разлагать целые числа на составляющие их множители).

74. Разложение целых одночленов. Возьмем какой-нибудь целый одночлен, напр. $6a^2b^3$. Так как он представляет собой произведение, то по одному его виду его сразу можно разложить на составляющие множители. Так:

$$6a^2b^3 = 2 \cdot 3\,(aa)\,(bbb) = 2 \cdot 3aabbb.$$

Соединяя эти сомножители в какие-нибудь группы (пользуясь сочетательным свойством умножения), мы можем для этого одночлена указать разнообразные разложения, напр.:

$$6a^2b^3 = (6a)\,(ab^3) = (2a^2b)\,(3b^2) = (3ab^2)\,(2ab) \text{ и т. п.}$$

75. Разложение многочленов. Укажем простейшие случаи, когда многочлен может быть разложен на множители.

а) Так как $(a + b - c)\,m = am + bm - cm$, то и наоборот:

$$am + bm - cm = (a + b - c)\,m.$$

Таким образом, *если все члены многочлена содержат общий множитель, то его можно вынести за скобки.*

Напр.: 1) $x^6 - 2x^2 + 3x = x\,(x^5 - 2x + 3)$.
2) $16a^2 - 4a^3 = 4a^2\,(4 - a)$.
3) $5m(x - 1) + 3n\,(x - 1) = (x - 1)\,(5m + 3n)$.

б) Так как

$$(a + b)\,(a - b) = a^2 - b^2,$$

то и наоборот:

$$a^2 - b^2 = (a + b)\,(a - b).$$

Таким образом, *двучлен, представляющий собой квадрат одного числа без квадрата другого числа, можно заменить произведением суммы этих чисел на их разность.*

Напр.: 1) $x^2 - 4 = x^2 - 2^2 = (x + 2)\,(x - 2)$.
2) $y^2 - 1 = y^2 - 1^2 = (y + 1)\,(y - 1)$.
3) $9a^2 - \frac{1}{4} = (3a)^2 - \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \left(3a + \frac{1}{2}\right)\left(3a - \frac{1}{2}\right)$.
4) $25x^2 - 0{,}01 = (5x)^2 - 0{,}1^2 = (5x + 0{,}1)\,(5x - 0{,}1)$
5) $m^4 - n^4 = (m^2)^2 - (n^2)^2 = (m^2 + n^2)\,(m^2 - n^2) =$
$= (m^2 + n^2)\,(m + n)\,(m - n)$.
6) $x^2 - (x - 1)^2 = [x + (x - 1)]\,[x - (x - 1)] =$
$= (x + x - 1)\,(x - x + 1) = 2x - 1$.

в) Так как $(a+b)^2=a^2+2ab+b^2$ и $(a-b)^2=a^2-2ab+b^2$, то и наоборот:

$$a^2+2ab+b^2=(a+b)^2=(a+b)(a+b)$$

и

$$a^2-2ab+b^2=(a-b)^2=(a-b)(a-b).$$

Значит, *трехчлен, представляющий собой сумму квадратов каких-нибудь двух чисел, увеличенную или уменьшенную на удвоенное произведение этих чисел, можно заменить квадратом суммы или разности этих чисел.*

Примеры.

1) a^2+2a+1. Так как $1=1^2$ и $2a=2a\cdot1$, то

$$a^2+2a+1=(a+1)^2.$$

2) x^4+4-4x^2. Здесь $x^4=(x^2)^2$, $4=2^2$ и $4x^2=2x^2\cdot2$; поэтому: $x^4+4-4x^2=(x^2-2)^2$. Можно также написать, что $x^4+4-4x^2=(2-x^2)^2$, так как двучлены x^2-2 и $2-x^2$, будучи возвышены в квадрат, дают трехчлены, отличающиеся только порядком членов:

$$(x^2-2)^2=x^4-4x^2+4;\quad (2-x^2)^2=4-4x^2+x^4.$$

3) $-x+25x^2+0{,}01$. Здесь есть два квадрата: $25x^2=(5x)^2$ и $0{,}01=0{,}1^2$. Удвоенное произведение чисел $5x$ и $0{,}1$ составляет: $2\cdot5x\cdot0{,}1=x$. Так как в данном трехчлене оба квадрата стоят со знаком $+$, а удвоенное произведение (т. е. x) со знаком $-$, то

$$-x+25x^2+0{,}01=25x^2-x+0{,}01=(5x-0{,}1)^2=(0{,}1-5x)^2.$$

4) $-x^2-y^2+2xy$. Вынесем знак $-$ за скобки: $-(x^2+y^2-2xy)$. Трехчлен, стоящий в скобках, очевидно, есть $(x-y)^2$. Значит:

$$-x^2-y^2+2xy=-(x^2+y^2-2xy)=-(x-y)^2=-(y-x)^2.$$

г) Иногда многочлен можно разложить на множители *посредством соединения его членов в некоторые группы.*

Напр.: 1) $ax+ay+bx+by=(ax+ay)+(bx+by)=$
$=a(x+y)+b\,(x+y)=(x+y)\,(a+b).$

2) $12-4x-3x^2+x^3=(12-4x)-(3x^2-x^3)=$
$=4(3-x)-x^2\,(3-x)=(3-x)\,(4-x^2)=$
$=(3-x)\,(2+x)\,(2-x).$

3) $m^2+n^2-2mn-p^2=(m^2+n^2-2mn)-p^2=$
$=(m-n)^2-p^2=(m-n+p)\,(m-n-p).$

4) $x^2-y^2+6y-9=x^2-(y^2-6y+9)=x^2-(y-3)^2=$
$=[x+(y-3)]\,[x-(y-3)]=(x+y-3)(x-y+3).$

Глава шестая

Алгебраические дроби.

76. Отличие алгебраической дроби от арифметической. Как мы уже говорили раньше (§ 73), частное от деления двух алгебраических выражений в том случае, когда деление только указано, называется алгебраической дробью. Таковы, напр., выражения:

$$\frac{a}{b},\ \frac{a+b}{c-d},\ \frac{2x^2-x+5}{x+2}.$$

В таких выражениях делимое называется числителем, делитель — знаменателем, а то и другое — членами дроби.

Вспомним, что и арифметическая дробь тоже представляет собою частное от деления числителя на знаменатель. Так, дробь $^3/_5$ не только означает три таких доли, каких в единице содержится пять; дробь эта также означает пятую часть трех единиц, т. е. она есть частное от деления 3 на 5. Но отличие алгебраической дроби от арифметической состоит в том, что арифметическая дробь есть частное от деления одного целого положительного числа на другое целое положительное число, тогда как алгебраическая дробь есть частное от деления каких угодно чисел, как целых, так и дробных, как положительных, так и отрицательных. Напр., выражения:

$$\frac{^2/_5}{-3},\ \frac{-0.8}{2^1/_2},\ \frac{-10}{-^1/_3}$$

нельзя назвать дробями арифметическими; это будут частные случаи дробей алгебраических. Таким образом, алгебраическая дробь представляет собою понятие более широкое, чем дробь арифметическая; она включает в себе дробь арифметическую как частный случай.

Однако, несмотря на такое различие, все свойства арифметической дроби принадлежат, как это мы увидим в этой главе, и алгебраической дроби.

77. Основное свойство дроби. Так как дробь есть частное от деления числителя на знаменатель, а частное не изменяется от умножения (или деления) делимого и делителя на одно и то же число (кроме нуля) (§ 34, е), то это же свойство принадлежит и дроби, т. е. *величина дроби не изменяется, если ее числитель и знаменатель умножим (или разделим) на одно и* *то же число* (кроме нуля). Напр., если мы умножим числитель и знаменатель дроби

$$\frac{-{}^2/_3}{{}^7/_5},$$

положим, на $-{}^4/_9$, то будем иметь:

прежняя дробь $-\frac{2}{3}:\frac{7}{5}=-\frac{10}{21}$;

новая дробь: $\left[\left(-\frac{2}{3}\right)\cdot\left(-\frac{4}{9}\right)\right]:\left[\frac{7}{5}\cdot\left(-\frac{4}{9}\right)\right]=\left(+\frac{8}{27}\right):\left(-\frac{28}{45}\right)=$

$$=-\frac{8\cdot 45}{27\cdot 28}=-\frac{360}{756}=-\frac{10}{21};$$

мы видим, что величина дроби осталась прежняя.

Пользуясь этим свойством дроби, мы можем выполнять над алгебраическими дробями такие же преобразования, какие в арифметике указываются для дробей арифметических, т. е. мы можем сокращать, если возможно, дроби и приводить их, если нужно, к одному знаменателю. Рассмотрим эти преобразования и укажем еще некоторые, которые в арифметике не применяются.

78. Приведение членов дроби к целому виду. Если случится, что члены дроби сами содержат в себе дроби, то, умножая их на выбранное надлежащим образом число или на алгебраическое выражение, мы можем освободиться от этих дробей.

Примеры.

1) $\frac{{}^3/_4 a}{b}$; умножив оба члена на 4, получим $\frac{3a}{4b}$.

2) $\frac{7a}{2^3/_5 b}=\frac{7a}{{}^{13}/_5 b}$; » » » 5, » $\frac{35a}{13b}$.

3) $\frac{{}^2/_3 m}{{}^7/_8 n}$; » » » 24 » $\frac{16m}{21n}$.

4) $\frac{ax-1}{1-\frac{1}{x}}$ » » » x » $\frac{ax^2-x}{x-1}$.

79. Перемена знаков у членов дроби. Переменить знак на противоположный перед числителем и знаменателем дроби — это все равно, что умножить их на -1, от чего величина дроби не изменится. Так:

$$\frac{-8}{-4}=2 \text{ и } \frac{+8}{+4}=2;\ \frac{-10}{+2}=-5 \text{ и } \frac{+10}{-2}=-5.$$

Заметим, что если переменим знак перед каким-нибудь одним членом дроби и в то же время переменим знак перед самою дробью, то величина дроби тоже не изменится; напр.,

$$\frac{-10}{+2}=-5;\ -\frac{-10}{-2}=-5;\ -\frac{+10}{+2}=-5.$$

Этими свойствами дроби можно иногда воспользоваться для некоторого ее преобразования; напр.:

$$\frac{m^2-n^2}{n-m}=\frac{m^2-n^2}{-(m-n)}=-\frac{(m+n)(m-n)}{m-n}=-(m+n).$$

80. Сокращение дробей. Чтобы сократить алгебраическую дробь, надо, если возможно, предварительно найти такое алгебраическое выражение, на которое оба члена дроби делятся, и затем их разделить на это выражение. Рассмотрим, как это всего удобнее делать в следующих двух случаях.

а) Возьмем дробь, у которой оба члена — целые одночлены; напр.:

$$\frac{12a^2x^3}{20ax^2}.$$

Коэффициенты 12 и 20 делятся на 4, а буквенные выражения делятся на a и на x^2. Значит, эту дробь можно сократить на $4ax^2$:

$$\frac{12a^2x^3}{20ax^2}\overset{\overset{4ax^2}{\smile}}{=}\frac{3ax}{5}=\frac{3}{5}ax$$

(над дробью мы написали те общие множители, на которые дробь сокращаем; вместо деления $3ax$ на 5 мы разделили на 5 только коэффициент 3).

б) Если у дроби числитель или знаменатель (или тот и другой) — многочлены, то надо предварительно разложить эти многочлены на множители (так, как было указано в § 75); если в числе их окажутся одинаковые, то на них дробь можно сократить.

Примеры.

$$\frac{6x^2+8xy}{9xy+12y^2}=\frac{2x(3x+4y)}{3y(3x+4y)}=\frac{2x}{3y};$$

$$\frac{x^2-1}{2x+2}=\frac{(x+1)(x-1)}{2(x+1)}=\frac{x-1}{2}=\frac{1}{2}(x-1)$$

(вместо деления на 2 поставлено умножение на $^1/_2$, что равносильно делению на 2).

81. Приведение дробей к общему знаменателю. а) Пусть требуется привести к общему знаменателю *дроби со знаменателями, выраженными цифрами*, напр. такие:

$$\frac{a}{3},\ \frac{2a^2}{15},\ \frac{5a^2}{18}.$$

Для этого разложим знаменатели на простые множители:

$$3; \qquad 15 = 3 \cdot 5; \qquad 18 = 2 \cdot 3 \cdot 3$$

и найдем их наименьшее кратное; это будет $2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 5 = 90$. Теперь найдем для каждого знаменателя дополнительный множитель, на который надо умножить этот знаменатель, чтобы получить вместо него 90. Эти дополнительные множители будут: $90:3 = 30$; $90:15 = 6$, $90:18 = 5$. Чтобы дроби не изменили своей величины, надо и числители умножить на те же числа, на которые умножаем знаменатели:

$$\overset{\overset{30}{\smile}}{\frac{a}{3}} = \frac{30a}{90};\ \overset{\overset{6}{\smile}}{\frac{2a^2}{15}} = \frac{12a^2}{90};\ \overset{\overset{5}{\smile}}{\frac{5a^2}{18}} = \frac{25a^2}{90}$$

(над дробями написаны дополнительные множители).

б) Возьмем теперь дроби, у которых *знаменатели — буквенные одночлены*; напр.:

$$\frac{a}{2b},\ \frac{c}{3ab},\ \frac{d}{5ab^2}.$$

За общий знаменатель можно, очевидно, взять $30ab^2$. Дополнительными множителями тогда будут: $15ab$, $10b$ и 6:

$$\overset{\overset{15ab}{\smile}}{\frac{a}{2b}} = \frac{15a^2b}{30ab^2};\ \overset{\overset{10b}{\smile}}{\frac{c}{3ab}} = \frac{10bc}{30ab^2};\ \overset{\overset{6}{\smile}}{\frac{d}{5ab^2}} = \frac{6d}{30ab^2}.$$

в) Далее возьмем дроби, у которых *знаменатели многочлены*; напр.:

$$\frac{x}{a-b},\ \frac{y}{a+b},\ \frac{z}{a^2-b^2}.$$

Разложим каждый знаменатель на множители. Первые два не разлагаются, а третий $= (a+b)(a-b)$. Значит, общим знаменателем будет $a^2 - b^2$, и мы получим:

$$\overset{\overset{a+b}{\smile}}{\frac{x}{a-b}} = \frac{ax+bx}{a^2-b^2};\ \overset{\overset{a-b}{\smile}}{\frac{y}{a+b}} = \frac{ay-by}{a^2-b^2};\ \frac{z}{a^2-b^2}.$$

г) Может случиться, что *никакая пара знаменателей не имеет общих множителей.* Тогда надо поступить так, как это делается в подобном случае в арифметике, а именно: умножить числитель и знаменатель каждой дроби на *произведение* знаменателей всех остальных дробей. Напр.:

1) $\frac{a}{3m}, \frac{2b}{5n}, \frac{3c}{2p};\ \frac{a\cdot 5n\cdot 2p}{3m\cdot 5n\cdot 2p}, \frac{2b\cdot 3m\cdot 2p}{5n\cdot 3m\cdot 2p}, \frac{3c\cdot 3m\cdot 5n}{2p\cdot 3m\cdot 5n},$

т. е.

$$\frac{10anp}{30mnp}, \frac{12bmp}{30mnp}, \frac{45cmn}{30mnp}.$$

2) $\frac{a}{a+b}, \frac{b}{a-b};\ \frac{a(a-b)}{(a+b)(a-b)}, \frac{b(a+b)}{(a+b)(a-b)},$

т. е.

$$\frac{a^2-ab}{a^2-b^2}, \frac{ab+b^2}{a^2-b^2}.$$

82. Сложение и вычитание дробей. По правилу деления многочлена на одночлен (§ 68) мы можем написать:

$$\frac{a+b+c}{m}=\frac{a}{m}+\frac{b}{m}+\frac{c}{m};\quad \frac{a-b}{m}=\frac{a}{m}-\frac{b}{m}.$$

Читая эти равенства справа налево, находим:

1) *чтобы сложить дроби с одинаковыми знаменателями, можно сложить их числители и под суммою подписать тот же знаменатель;*

2) *чтобы вычесть дроби с одинаковыми знаменателями, можно вычесть их числители и под разностью подписать тот же числитель.*

Если данные для сложения или вычитания дроби имеют разные знаменатели, то предварительно их следует привести к одному знаменателю. Напр.:

$$1)\quad \overset{df}{\frac{a}{b}}+\overset{bf}{\frac{c}{d}}+\overset{bd}{\frac{e}{f}}=\frac{adf+cbf+ebd}{bdf}.$$

$$2)\quad \overset{2b}{\frac{3m^2}{10a^2bc}}-\overset{5ac}{\frac{5n^2}{4ab^2}}=\frac{6bm^2-25acn^2}{20a^2b^2c}.$$

$$3)\quad \frac{x+1}{2x-2}-\frac{x^2+3}{2x^2-2}.$$

$2x-2=2(x-1)$ | доп. множ. $= x+1$

$2x^2-2=2(x^2-1)=2(x+1)(x-1)$ | " " $=$ 1.

Общ. знам. $2(x+1)(x-1)$.

В результате вычитания получим:

$$\frac{(x+1)^2-(x^2+3)}{2(x+1)(x-1)}=\frac{x^2+2x+1-x^2-3}{2(x+1)(x-1)}=\frac{2x-2}{2(x+1)(x-1)}=\frac{1}{x+1}.$$

83. Умножение дробей. *Чтобы умножить дробь на дробь, можно умножить числитель на числитель и знаменатель на знаменатель и первое произведение взять числителем, а второе знаменателем,* т. е.

$$\frac{a}{b}\times\frac{c}{d}=\frac{ac}{bd} \qquad (1)$$

Напомним объяснение этого правила в применении к дробям арифметическим. Пусть дано умножить $^2/_3\times{}^4/_5$. Это значит: найти $^4/_5$ от $^2/_3$ (напр., найти $^4/_5$ длины, равной $^2/_3$ метра). Для этого надо сначала найти $^1/_5$ от $^2/_3$, а затем $^4/_5$ от $^2/_3$. Чтобы найти $^1/_5$ от $^2/_3$, надо $^2/_3$ уменьшить в 5 раз; получим $^2/_{15}$. Чтобы найти теперь $^4/_5$ от $^2/_3$, надо $^2/_{15}$ увеличить в 4 раза; получим $^8/_{15}$. Таким образом:

$$\frac{2}{3}\cdot\frac{4}{5}=\frac{8}{15}=\frac{2\cdot4}{3\cdot5}.$$

Теперь мы проверим это правило и для дробей алгебраических, когда числа a, b, c и d будут какие угодно. Предположим сначала, что все эти числа положительные, но не целые, а дробные. Пусть, напр.:

$$a={}^2/_3,\ b={}^7/_8,\ c={}^5/_6 \text{ и } d={}^9/_4.$$

Подставим эти числа в равенство (1), вычислим отдельно его левую и его правую части и сравним результаты, которые получим (при вычислении будем руководствоваться правилами деления и умножения арифметических дробей):

$$\frac{a}{b}=\frac{2}{3}:\frac{7}{8}=\frac{2\cdot8}{3\cdot7};\quad \frac{c}{d}=\frac{5}{6}:\frac{9}{4}=\frac{5\cdot4}{6\cdot9};$$

$$\frac{a}{b}\cdot\frac{c}{d}=\frac{2\cdot8}{3\cdot7}\cdot\frac{5\cdot4}{6\cdot9}=\frac{2\cdot8\cdot5\cdot4}{3\cdot7\cdot6\cdot9}$$

(окончательного вычисления производить не будем).

Теперь найдем правую часть равенства (1):

$$ac=\frac{2}{3}\cdot\frac{5}{6}=\frac{2\cdot5}{3\cdot6};\quad bd=\frac{7}{8}\cdot\frac{9}{4}=\frac{7\cdot9}{8\cdot4};$$

$$\frac{ac}{bd}=\frac{2\cdot5}{3\cdot6}:\frac{7\cdot9}{8\cdot4}=\frac{2\cdot5\cdot8\cdot4}{3\cdot6\cdot7\cdot9}.$$

Сравнивая полученные результаты, мы видим, что они одинаковы, так как (согласно переместительному свойству умножения целых чисел) $2\cdot8\cdot5\cdot4=2\cdot5\cdot8\cdot4$ и $3\cdot7\cdot6\cdot9=3\cdot6\cdot7\cdot9$. Следовательно, равенство (1) остается верным и в этом случае.

Теперь допустим, что какое-нибудь из чисел a, b, c и d сделалось отрицательным. Пусть напр., $a=-{}^2/_3$ (b, c и d имеют прежние значения). Тогда дробь $\frac{a}{b}$ сделается отрицательной, и вся левая часть равенства (1) также будет отрицательное число. В правой части произведение ac сделается отрицательным, и потому вся правая часть тоже будет отрицательное число. Абсолютная же величина у левой части и у правой останется прежняя. Значит, равенство (1) не нарушится. Так же убедимся, что равенство (1) останется верным и тогда, когда и другие числа сделаются отрицательными.

Все то, что мы сейчас говорили о частном примере, может быть повторено о всяком другом примере; значит, равенство (1) верно при всяких значениях букв a, b, c и d.

84. Деление дробей. *Чтобы разделить дробь на дробь, можно умножить числитель первой дроби на знаменатель второй, знаменатель первой на числитель второй и первое произведение взять числителем, а второе знаменателем,* т. е.

$$\frac{a}{b}:\frac{c}{d}=\frac{ad}{bc}.$$

Что это равенство верно для всяких чисел a, b, c, d, можно убедиться простою поверкою деления: умножив частное на делитель (по доказанному выше правилу умножения дробей), мы получим делимое:

$$\frac{ad}{bc}\cdot\frac{c}{d}=\frac{adc}{bcd}\overset{\underline{cd}}{=}\frac{a}{b}.$$

85. Замечания. 1) Так как $\frac{ad}{bc}=\frac{a}{b}\cdot\frac{d}{c}$, то правило деления можно высказать иначе: *чтобы разделить дробь на дробь, можно первую дробь умножить на обратную второй.*

2) Всякое целое алгебраическое выражение можно рассматривать как дробь, у которой числитель есть это целое выражение, а знаменателем служит 1; напр., $a=\frac{a}{1}$; $3x^2=\frac{3x^2}{1}$ и т. п. Поэтому данные нами правила действий над дробями можно применять и к таким случаям, когда какое-нибудь из данных

выражений есть целое, стоит только это целое изобразить хотя бы мысленно) дробью. Напр.:

$$3a^2-\frac{2x}{ab}=\frac{3a^2}{1}-\frac{2x}{ab}=\frac{3a^3b}{ab}-\frac{2x}{ab}=\frac{3a^3b-2x}{ab};$$

$$a\cdot\frac{b}{c}=\frac{a}{1}\cdot\frac{b}{c}=\frac{ab}{1\cdot c}=\frac{ab}{c};$$

$$\frac{a}{b}:c=\frac{a}{b}:\frac{c}{1}=\frac{a\cdot 1}{bc}=\frac{a}{bc}.$$

86. Освобождение уравнения от знаменателей. Пусть дано уравнение:

$$\frac{5x-1}{2}-\frac{7x-2}{10}=6\,{}^3/_5-\frac{x}{2}.$$

Обратим $6^3/_5$ в неправильную дробь и приведем все члены к одному знаменателю:

$$\frac{25x-5}{10}-\frac{7x-2}{10}=\frac{66}{10}-\frac{5x}{10}.$$

Теперь умножим все члены на 10; тогда знаменатель 10 уничтожится, и мы получим уравнение без дробей:

$$25x-5-(7x-2)=66-5x.$$

Для избежания ошибки мы заключили двучлен $7x-2$ в скобки, чтобы показать, что знак —, стоявший в данном уравнении перед второю дробью, относится не к $7x$, а ко всему двучлену $7x-2$ (к числителю второй дроби). Раскрыв эти скобки по правилу вычитания, получим:

$$25x-5-7x+2=66-5x;$$

$$25x-7x+5x=66+5-2;\quad 23x=69;\quad x=3.$$

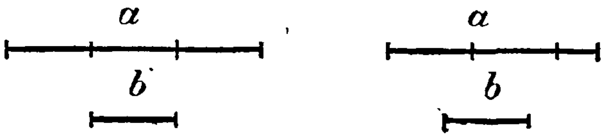
Таким образом, *чтобы освободить уравнение от знаменателей, надо привести все члены его к одному знаменателю и затем умножить их на этот знаменатель* (другими словами, *отбросить его*).

Глава седьмая.

Отношение и пропорция.

87. Отношение. Часто приходится сравнивать между собою одну величину с другой величиной, однородной ей, с целью узнать, сколько раз первая величина содержит в себе вторую.

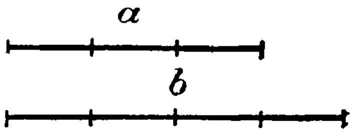
Напр., мы с этою целью можем сравнивать вес какого-нибудь предмета с весом другого предмета, цену одного товара с ценою другого товара и т. п. Во всех таких случаях результат сравнения выражается числом, которое может быть и целым, и целым с дробью, и дробным. Пусть, напр., мы сравниваем длину a с другою длиною b, и результат сравнения оказался целым числом 3 (черт. 14, левый). Это значит, что длина a содержит в себе длину b ровно 3 раза (другими словами, a больше b в 3 раза). Если результат сравнения есть целое число с дробью, напр. $2^{1}/_{2}$ (черт. 14, правый), то это значит, что a содержит в себе b $2^{1}/_{2}$ раза (a больше b в $2^{1}/_{2}$ раза). Если, наконец, результат сравнения есть дробь, положим $^{3}/_{4}$ (черт. 15), то a не содержит в себе b ни одного раза, а составляет только $^{3}/_{4}$ b. Во всех этих случаях результат сравнения есть отвлеченное число, на которое надо умножить вторую величину, чтобы получить первую. Так, во взятых нами примерах:



Черт. 14.

$$a=b\cdot 3;\quad a=b\cdot 2^{1}/_{2};\quad a=b\cdot {}^{3}/_{4}.$$

Результат сравнения одной величины с другою однородною величиною принято называть отношением первой величины ко второй. Значит, *отношением одной величины к другой однородной величине называется отвлеченное число, на которое надо умножить вторую величину, чтобы получить первую.* Так как это число есть частное от деления первой величины на вторую, то отношение обозначается знаком деления. Так, можно писать:



Черт. 15.

$$\frac{a}{b}\ (\text{или } a:b)=3;\qquad \frac{a}{b}=2^{1}/_{2};\qquad \frac{a}{b}={}^{3}/_{4},\quad \text{и т. п.}$$

Величины, между которыми берется отношение, называются членами отношения, причем первая величина называется предыдущим членом, а вторая — последующим.

Если величины измерены одною и тою же единицей и выражены числами, то отношение их можно заменить отношением этих чисел. Напр., отношение двух весов, одного в 80 *г*, а другого в 15 *г*, равно отношению чисел 80 и 15, т. е. оно равно частному 80:15, что составляет $5\frac{1}{3}$; равным образом отношение угла в 30° к прямому углу равно частному 30:90, т. е. дроби $\frac{1}{3}$.

Сравнивать между собою приходится большею частью величины положительные; поэтому оба члена отношения и само отношение мы будем предполагать выраженными числами положительными.

88. Зависимость между отношением и его членами та же самая, какая существует между делимым, делителем и частным. Так:

а) Предыдущий член равен последующему, умноженному на отношение (делимое равно делителю, умноженному на частное). Если, напр., отношение некоторого неизвестного числа x к числу 100 равно $2\frac{1}{2}$, то $x = 100 \cdot 2\frac{1}{2} = 250$.

б) Последующий член равен предыдущему, деленному на отношение (делитель равен делимому, деленному на частное). Так, если известно, что $15 : x = 5$, то $x = 15 : 5 = 3$.

в) Отношение не изменится, если оба его члена умножим или разделим на одно и то же число (частное не изменится, если...).

89. Приведение членов отношения к целому виду. Умножая оба члена отношения на одно и то же число, мы можем отношение с дробными членами заменить отношением целых чисел. Так, отношение $\frac{7}{3} : 5$ по умножении его членов на 3 обратится в отношение целых чисел 7:15; отношение $\frac{9}{14} : \frac{10}{21}$ после умножения его членов на общий знаменатель 42 обратится также в отношение целых чисел 27:20.

90. Сокращение отношения. Если оба члена отношения — целые числа, делящиеся на какой-нибудь общий делитель, то такое отношение можно сократить. Так, отношение 42:12 по разделении его членов на 6 будет 7:2.

91. Обратные отношения. Если мы переставим члены отношения, т. е. предыдущий член сделаем последующим, и наоборот, то получим новое отношение, которое называется обратным прежнему. Так, отношение метра к сантиметру обратно отношению сантиметра к метру; первое равно числу 100, второе равно обратному числу 0,01.

92. Пропорция. Заметив, что отношение килограмма к грамму равно 1000 и что отношение километра к метру также равно 1000, мы можем написать равенство:

$$\frac{\text{килограмм}}{\text{грамм}}=\frac{\text{километр}}{\text{метр}},$$

или килограмм: грамм = километр: метр, что читается так: отношение килограмма к грамму равно отношению километра к метру; или так: килограмм относится к грамму так, как километр относится к метру (или еще так: килограмм больше грамма во столько раз, во сколько раз километр больше метра).

Равенство двух отношений принято называть пропорцией. Конечно, величины, входящие в каждое отношение, должны быть *однородны;* так, в нашем примере величины первого отношения — веса̀, а величины второго отношения — длины.

Из четырех величин, составляющих пропорцию, первая и четвертая называются крайними членами, вторая и третья — средними членами, первая и третья — предыдущими, вторая и четвертая — последующими. Последняя величина называется также четвертой пропорциональной к первым трем величинам.

Мы будем предполагать, что все четыре члена пропорции выражены числами; такую пропорцию мы будем называть числовою.

93. Основное свойство числовой пропорции. Пусть мы имеем такие числовые пропорции:

$$\frac{21}{7}=\frac{15}{5}\ (\text{каждое отношение}=3)$$

и

$$\frac{2^1/_2}{^3/_4}=\frac{10}{3}\ (\text{каждое отношение}=3^1/_3).$$

Возьмем в каждой пропорции произведение крайних членов и произведение средних и сравним их между собою. В первой пропорции произведение крайних равно $21\cdot5=105$, и произведение средних равно $7\cdot15=105$; во второй пропорции произведение крайних $=2^1/_2\cdot3=7^1/_2$ и произведение средних $={}^3/_4\cdot10=$ $=7^1/_2$.

Таким образом, в каждой из взятых пропорций произведение крайних членов равно произведению средних.

Чтобы показать, что свойство это принадлежит всякой числовой пропорции, возьмем пропорцию в буквенном виде:

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d}.$$

Так как каждое из двух отношений, составляющих пропорцию, есть частное от деления предыдущего члена на последующий, то можно сказать, что пропорция есть равенство двух дробей. Приведем эти дроби к общему знаменателю bd.

$$\overset{d}{\frac{a}{b}} = \overset{b}{\frac{c}{d}}; \quad \frac{ad}{bd} = \frac{cb}{bd}.$$

Умножим теперь обе части равенства на bd (от чего равенство не нарушится); тогда общий знаменатель сократится, и мы получим равенство:

$$ad = cb,$$

выражающее, что *во всякой числовой пропорции произведение крайних членов равно произведению средних.*

Отсюда выходит, что каждый крайний член пропорции равен произведению средних, деленному на другой крайний, и каждый средний член пропорции равен произведению крайних, деленному на другой средний. Это дает нам возможность быстро решать уравнения, данные в виде пропорций; напр., из уравнения

$$\frac{10}{x} = \frac{45}{20}$$

выводим прямо: $x = \frac{10 \cdot 20}{45} = 4^4/_9$.

94. Обратное предложение. Положим, мы имеем 4 таких числа, что произведение двух из них равно произведению двух остальных, напр.:

$$5 \cdot 12 = 30 \cdot 2.$$

Такое равенство мы можем превратить в ряд пропорций. Для этого разделим обе части на каждое из таких произведений:

$$5 \cdot 30; \qquad 5 \cdot 2; \qquad 12 \cdot 30; \qquad 12 \cdot 2,$$

в которых один сомножитель взят из одного данного произведения, а другой — из другого. Тогда получим 4 других равенства (если равные числа разделим на равные, то получим равные), а именно:

$$\frac{5\cdot 12}{5\cdot 30}=\frac{30\cdot 2}{5\cdot 30};\qquad \frac{5\cdot 12}{5\cdot 2}=\frac{30\cdot 2}{5\cdot 2};\qquad \frac{5\cdot 12}{12\cdot 30}=\frac{30\cdot 2}{12\cdot 30};\qquad \frac{5\cdot 12}{12\cdot 2}=\frac{30\cdot 2}{12\cdot 2}.$$

Сократив все эти дроби, найдем:

$$\frac{12}{30}=\frac{2}{5};\qquad \frac{12}{2}=\frac{30}{5};\qquad \frac{5}{30}=\frac{2}{12};\qquad \frac{5}{2}=\frac{30}{12}.$$

Мы получим таким образом 4 пропорции, в которых крайними членами служат сомножители одного из данных произведений, а средними членами — сомножители другого данного произведения.

Подобно этому равенство $0{,}3\cdot 4=6\cdot 0{,}2$ мы можем превратить в такие пропорции:

$$\frac{0{,}3}{6}=\frac{0{,}2}{4};\qquad \frac{0{,}3}{0{,}2}=\frac{6}{4};\qquad \frac{4}{6}=\frac{0{,}2}{0{,}3};\qquad \frac{4}{0{,}2}=\frac{6}{0{,}3};$$

или равенство: $5x=3y$ можем превратить в пропорции:

$$5:3=y:x;\qquad x:y=3:5,\qquad \text{и т. п.}$$

Таким образом, *если произведение двух чисел равно произведению двух других чисел, то из этих 4 чисел можно составить пропорции, беря сомножители одного произведения за крайние члены, а сомножители другого произведения за средние члены пропорций.*

95. Следствие. Во всякой числовой пропорции можно переставить средние члены между собою, крайние члены между собою, или средние поставить на место крайних, и наоборот, так как от таких перестановок не нарушится равенство между произведением крайних и произведением средних и, следовательно, не нарушится пропорциональность чисел.

√ **96. Среднее геометрическое.** Возьмем пропорцию, в которой средние члены одинаковы; например:

$$36:12=12:4.$$

Повторяющийся член такой пропорции называется средним геометрическим числом двух остальных членов пропорции: 12 есть среднее геометрическое 36 и 4. Таким образом, если требуется найти среднее геометрическое двух чисел a и b, то, обозначив его буквой x, мы можем написать пропорцию:

$$a : x = x : b;$$

откуда

$$x^2 = ab. \quad - \sqrt{ab}$$

Значит, среднее геометрическое двух данных чисел есть такое третье число, квадрат которого равен произведению данных чисел. Напр., среднее геометрическое 25 и 4 равно 10, потому что $10^2 = 25 \cdot 4$ [1].

97. Среднее арифметическое. Средним арифметическим *нескольких данных чисел называется частное от деления суммы этих чисел на число их.* Напр., среднее арифметическое 4 чисел: 10, -2, -8 и 12 равно:

$$\frac{10 + (-2) + (-8) + 12}{4} = \frac{10 - 2 - 8 + 12}{4} = \frac{12}{4} = 3.$$

Среднее арифметическое обладает тем свойством, что если при сложении данных чисел мы заменим каждое из них средним арифметическим, то от этой замены сумма не изменится. Так, сумма чисел 10, -2, -8 и 12 равна 12 и сумма $3 + 3 + 3 + 3$ также равна 12. Положим, напр., что производительность фабрики в течение первых четырех месяцев текущего года, сравнительно с производительностью ее в декабре предыдущего года, повысилась: в январе на 10%, в феврале на -2%, в марте на -8% (значит, в последние 2 месяца производительность понизилась) и в апреле на $+12$%. Тогда можно сказать, что среднее повышение производительности за эти 4 месяца составляет 3% в месяц. Это надо понимать так, что производительность фабрики за все 4 месяца оказалась такая же, какая была бы, если бы она повышалась в каждый месяц одинаково, именно на 3% (сравнительно с декабрьской производительностью). В подобном же смысле говорят часто о среднем доходе, о средней скорости движения, о средней плотности населения и т. п. Во всех таких выражениях подразумевается, что речь идет о среднем арифметическом.

---

[1] Среднее геометрическое потому называется геометрическим (в отличие от среднего арифметического, о котором мы сейчас скажем), что оно часто встречается в геометрии (напр., катет есть средняя пропорциональная величина между всей гипотенузой и прилежащим к этому катету отрезком гипотенузы, и пр.).

98. Производные пропорции. Из всякой пропорции, помимо перестановки ее членов, можно получить еще некоторые другие пропорции, называемые производными. Укажем две из них.

Если каждое из равных отношений, составляющих пропорцию, увеличим или уменьшим на 1, то равенство между отношениями, очевидно, не нарушится. Поэтому, если

$$\frac{a}{b}=\frac{c}{d},$$

то и

$$\frac{a}{b}+1=\frac{c}{d}+1 \text{ и } \frac{a}{b}-1=\frac{c}{d}-1.$$

Приведя 1 к общему знаменателю с тою дробью, к которой она приложена или от которой вычтена, мы получим:

$$\frac{a}{b}+\frac{b}{b}=\frac{c}{d}+\frac{d}{d}; \text{ или } \frac{a+b}{b}=\frac{c+d}{d} \qquad (1)$$

и

$$\frac{a}{b}-\frac{b}{b}=\frac{c}{d}-\frac{d}{d}; \text{ или } \frac{a-b}{b}=\frac{c-d}{d}. \qquad (2)$$

Выведенные нами две производные пропорции мы можем высказать так: *во всякой пропорции сумма или разность членов первого отношения относится к последующему члену этого отношения так, как сумма или разность членов второго отношения относится к последующему члену этого отношения.*

Разделим равенство (1) и (2) на данное равенство $\frac{a}{b}=\frac{c}{d}$; тогда знаменатели b и d сократятся, и мы получим еще две производные пропорции:

$$\frac{a+b}{a}=\frac{c+d}{c}, \qquad (3)$$

$$\frac{a-b}{a}=\frac{c-d}{c}, \qquad (4)$$

которые можно высказать так: *сумма или разность членов первого отношения относится к предыдущему члену этого отношения так, как сумма или разность членов второго отношения относится к предыдущему члену этого отношения.*

Разделив почленно равенство (1) на равенство (2), найдем еще следующую производную пропорцию:

$$\frac{a+b}{a-b}=\frac{c+d}{c-d}, \qquad (5)$$

которую можно высказать так: *сумма членов первого отношения относится к их разности так, как сумма членов второго отношения относится к их разности.*

Переставив средние члены в двух производных пропорциях, получим еще другие производные пропорции, которые полезно заметить:

$$\frac{a+b}{c+d}=\frac{b}{d};\quad \frac{a-b}{c-d}=\frac{b}{d};\quad \frac{a+b}{c+d}=\frac{a}{c};\quad \frac{a-b}{c-d}=\frac{a}{c};\quad \frac{a+b}{c+d}=\frac{a-b}{c-d}.$$

99. Свойство равных отношений. Возьмем несколько равных отношений, напр., таких:

$$\frac{30}{10}=\frac{6}{2}=\frac{15}{5}\quad \text{(каждое отношение} = 3).$$

Сложим все предыдущие члены между собою и все последующие члены между собою и посмотрим, в каком отношении находятся эти две суммы. Сумма предыдущих равна: $30+6+15=51$; сумма последующих: $10+2+5=17$. Мы видим, что отношение первой суммы ко второй равно тому же числу 3, какому равны данные отношения, так что можно написать:

$$\frac{30+6+15}{10+2+5}=\frac{30}{10}=\frac{6}{2}=\frac{15}{5}\quad \text{(отношение} = 3).$$

Чтобы показать, что это свойство общее, возьмем несколько равных отношений в буквенном виде:

$$\frac{a}{b}=\frac{c}{d}=\frac{e}{f}=\dots\quad \text{(каждое отношение} = q).$$

Так как предыдущий член равен последующему члену, умноженному на отношение, то

$$a=bq,\qquad c=dq,\qquad e=fq,\ \dots$$

и следовательно, $a+c+e+\dots=bq+dq+fq+\dots$

т. е. $a+c+e\dots=q(b+d+f+\dots)$

Разделим обе части этого равенства на сумму $b+d+f+\dots$

$$\frac{a+c+e+\dots}{b+d+f+\dots}=q.$$

Но

$$q=\frac{a}{b}=\frac{c}{d}=\frac{e}{f}=\dots;$$

следовательно:

$$\frac{a+c+e+\ldots}{b+d+f+\ldots}=\frac{a}{b}=\frac{c}{d}=\frac{e}{f}=\ldots$$

Таким образом, *если несколько отношений равны между собою, то сумма всех предыдущих членов их относится к сумме всех последующих, как какой-нибудь из предыдущих относится к своему последующему.*

Так как всякая пропорция состоит из двух равных отношений, то указанное свойство принадлежит также и пропорции.

100. Арифметическое применение. (Пропорциональное деление.) Пусть требуется число 60 разделить на три части пропорционально числам 5, 7 и 8. Это надо понимать так, что требуется разделить 60 на такие три части x, y и z, чтобы x так относился к 5, как y относится к 7 и как z относится к 8, т. е. чтобы

$$\frac{x}{5}=\frac{y}{7}=\frac{z}{8}.$$

Применяя свойства равных отношений, найдем:

$$\frac{x+y+z}{5+7+8}=\frac{x}{5}=\frac{y}{7}=\frac{z}{8}.$$

Но

$$x+y+z=60,$$

значит:

$$\frac{60}{20}=\frac{x}{5};\ \frac{60}{20}=\frac{y}{7};\ \frac{60}{20}=\frac{z}{8}.$$

Отсюда находим:

$$x=\frac{60\cdot5}{20}=15,\ y=\frac{60\cdot7}{20}=21 \text{ и } z=\frac{60\cdot8}{20}=24.$$

101. Геометрическое применение. Пусть два многоугольника подобны и стороны одного будут a, b, c, d, ..., а сходственные стороны другого a', b', c', d', ... Тогда

$$\frac{a}{a'}=\frac{b}{b'}=\frac{c}{c'}=\frac{d}{d'}=\ldots$$

откуда

$$\frac{a+b+c+d+\ldots}{a'+b'+c'+d'+\ldots}=\frac{a}{a'}=\frac{b}{b'}=\ldots,$$

т. е. *периметры подобных многоугольников относятся, как сходственные стороны.*

Замечание. Производными пропорциями и свойством равных отношений можно иногда пользоваться для скорейшего решения уравнения, данного в виде пропорции. Приведем примеры.

$$1)\ \frac{3-x}{x}=\frac{40}{7}.$$

Составим производную пропорцию: сумма членов первого отношения относится к последующему члену того же отношения так, как . . . Тогда получим:

$$\frac{3}{x}=\frac{47}{7},$$

откуда

$$x=\frac{21}{47}.$$

$$2)\ \frac{a+x}{a-x}=\frac{m}{n}.$$

Составим производную пропорцию: сумма членов первого отношения относится к их разности так, как . . . Тогда получим:

$$\frac{2a}{2x}=\frac{m+n}{m-n},\ \text{или}\ \frac{a}{x}=\frac{m+n}{m-n}$$

откуда

$$x=\frac{a(m-n)}{m+n}.$$

$$3)\ \frac{a-x}{x}=\frac{x}{b-x}.$$

Составим новую пропорцию: сумма предыдущих относится к сумме последующих так, как . . :

$$\frac{a}{b}=\frac{a-x}{x}.$$

Теперь составим производную пропорцию: сумма членов первого отношения относится к последующему члену этого отношения так, как . . . :

$$\frac{a+b}{b}=\frac{a}{x};$$

откуда

$$x=\frac{ab}{a+b}.$$

Глава восьмая.

Пропорциональная зависимость (прямая и обратная).

102. Пропорциональная зависимость. Каждый из опыта знает, что если объем воды увеличится (или уменьшится) в каком-нибудь отношении, то и вес ее увеличится (или уменьшится) в том же отношении. Напр., 1 *л* воды весит 1 *кг*, 2 *л* воды весят 2 *кг*, $2^1/_2$ *л* воды весят $2^1/_2$ *кг* и т. д. (предполагается, конечно, что все прочие условия, влияющие на вес воды, остаются неизменными; напр., вода берется одинаково чистая, при одной и той же температуре и пр.). Такая зависимость между объемом воды и ее весом называется *пропорциональною* зависимостью. Вообще, если говорят, что две величины находятся между собою в пропорциональной зависимости (или пропорциональны друг другу), то это значит, что *с увеличением (или уменьшением) одной из них в каком-нибудь отношении другая тоже увеличивается (или уменьшается) в таком же отношении.* Так, стоимость товара, продаваемого на вес, пропорциональна его весу; плата рабочим пропорциональна числу их (при одинаковых прочих условиях); величина дроби пропорциональна ее числителю (при неизменном знаменателе); площадь прямоугольника пропорциональна его основанию при неизменной высоте и пропорциональна его высоте при неизменном основании и т. п.

103. Выражение пропорциональной зависимости формулой. Положим, мы решаем такую задачу:

Поезд железной дороги, двигаясь равномерно, проходит каждый час 30 *км*. Какое пространство пройдет этот поезд в a часов (a может быть числом целым и дробным)?

Пусть в a часов поезд пройдет x *км*.

Расположим данные и вопрос задачи так:

в 1 час проходится 30 *км*;
в a час „ x *км*.

При равномерном движении пространство, проходимое в течение какого-нибудь времени, пропорционально этому времени. Поэтому x должно быть более или менее 30 и во столько раз, во сколько a больше или меньше 1. Значит, мы можем написать пропорцию:

$$x : 30 = a : 1,$$

откуда.

$$x = 30a.$$

Мы получили, таким образом, формулу, по которой можно вычислить пространство, пройденное в любое число a часов. Напр., в 2 часа будет пройдено 30 *км* × 2, в $3^1/_2$ часа 30 *км* × $3^1/_2$, в $^3/_4$ часа 30 *км* × $^3/_4$. Значит, в выведенной формуле числа x и a будут переменные (соответствующие друг другу), число же 30 постоянное (означающее пространство, проходимое поездом в 1 час, т. е. скорость движения).

Из задач, подобных приведенной сейчас, мы усматриваем, что *если две величины пропорциональны, то численное значение одной из них равно некоторому постоянному числу, умноженному на соответствующее численное значение другой величины.*

Обратно, если зависимость между двумя какими-нибудь переменными величинами, которые мы обозначим y и x, выражается формулой вида $y = kx$, где k есть некоторое постоянное для этих величин число, то такие величины пропорциональны, так как из этой формулы видно, что с увеличением (или уменьшением) величины x в каком-нибудь отношении другая величина y тоже увеличивается (или уменьшается) и притом в том же самом отношении. Напр., как известно из геометрии, длина C окружности радиуса R выражается формулой:

$$C = 6{,}28R \quad (C = 2\pi R),$$

в которой R и C — переменные величины, а 6,28 — постоянное число; тогда мы можем заключить, что длина окружности пропорциональна ее радиусу.

Постоянное число, входящее сомножителем в подобные формулы, называется коэффициентом пропорциональности тех переменных величин, к которым формула относится.

104. Обратная пропорциональная зависимость. Иногда случается, что две переменные величины зависят одна от другой так, что с увеличением одной из них другая уменьшается и притом уменьшается в таком же отношении, в каком первая увеличивается. Такие величины называются обратно пропорциональными (а величины просто пропорциональные называются иногда прямо пропорциональными). Напр., число часов, в течение которого поезд железной дороги проходит весь путь от Москвы до Ленинграда, обратно пропорционально средней скорости движения этого поезда, так как с увеличением скорости в $1^1/_2$ раза, в 2 раза..., вообще в некотором отношении, число часов, в течение которого поезд пройдет расстояние от Москвы до Ленинграда, уменьшится в $1^1/_2$ раза, в 2 раза..., вообще в том же отношении, в каком скорость увеличилась. Подобно этому вес товара, который можно купить на данную сумму денег, напр. на 100 руб., обратно пропорционален цене килограмма этого товара; время, в течение которого выполняется рабочими заданная им работа, обратно пропорционально числу этих рабочих (конечно, при условии, что все рабочие работают одинаково успешно); величина дроби обратно пропорциональна ее знаменателю (при постоянном числителе), и т. п.

Замечание. Для того, чтобы две зависящие друг от друга величины были пропорциональны (прямо или обратно), не достаточно только того признака, что с увеличением одной величины другая тоже увеличивается (для прямой пропорциональности), или что с увеличением одной величины другая уменьшается (для обратной пропорциональности). Напр., если какое-нибудь слагаемое увеличится, то и сумма увеличится; но было бы ошибочно сказать, что сумма пропорциональна слагаемому, так как если увеличим слагаемое, положим в 3 раза, то сумма хотя и увеличится, но не в 3 раза. Подобно этому, нельзя, напр., сказать, что разность обратно пропорциональна вычитаемому, так как если увеличится вычитаемое, положим в 2 раза, то разность хотя и уменьшится, но не в 2 раза. Нужно, чтобы увеличение или уменьшение обеих величин происходило в одинаковое число раз (в одинаковом отношении).

105. Выражение обратной пропорциональной зависимости формулой. Положим, мы решаем задачу: один рабочий может выполнить некоторую работу в 12 дней; во сколько дней сделают ту же работу a рабочих?

Обозначим искомое число буквой x и расположим для ясности данные и вопрос задачи так:

1 рабочий исполняет работу в 12 дней
a рабочих исполняют „ „ x дней.

Очевидно, что число дней, потребное для выполнения одной и той же работы, обратно пропорционально числу рабочих. Поэтому x должно быть меньше 12 и во столько раз, во сколько a больше 1 (другими словами, во сколько 1 меньше a). Значит, отношение $x:12$ должно равняться не отношению $a:1$, как это было бы при прямой пропорциональной зависимости, а обратному отношению $1:a$. Значит, мы можем написать пропорцию:

$$x : 12 = 1 : a,$$

откуда

$$x = \frac{12}{a}.$$

По этой формуле мы можем находить число дней x, потребное для исполнения данной работы, при всяком числе a рабочих; напр., 2 рабочих окончат работу в 12/2 дней, 3 рабочих в 12/3 дней и т. п. Значит, числа x и a в этой формуле переменные, а число 12 постоянное, означающее, во сколько дней исполняется работа одним рабочим.

Из задач, подобных решенной сейчас, мы можем усмотреть, что *если две какие-нибудь величины* (которые мы обозначим буквами x и y) *обратно пропорциональны, то численное значение одной из них равно некоторому постоянному числу* (обозначим его k), *деленному на соответствующее значение другой величины*, т. е. $y = \frac{k}{x}$, если y и x представляют собою соответствующие значения этих величин.

Так как формулу $y = \frac{k}{x}$ можно представить так: $xy = k$, то зависимость между обратно пропорциональными величинами можно высказать еще иначе: *если две величины обратно пропорциональны, то произведение двух соответствующих друг другу, численных значений этих величин равно постоянному числу.*

Обратно, если зависимость между двумя переменными величинами выражается формулой:

$$y = \frac{k}{x} \text{ или } xy = k,$$

где k есть постоянное число, то эти величины обратно пропорциональны, так как из формулы видно, что если величина x увеличивается в несколько раз, то величина y уменьшается во столько же раз.

Напр., из физики известно, что при неизменной температуре произведение объема V данной массы газа на его упругость h есть величина постоянная; это, другими словами, означает, что упругость данной массы газа обратно пропорциональна его объему (при одной и той же температуре).

Замечание. Равенство $y=\frac{k}{x}$ может быть написано иначе, так:

$$y=k\cdot\frac{1}{x}.$$

В этом виде оно выражает, что величина y прямо пропорциональна величине дроби $\frac{1}{x}$. Значит, если число y обратно пропорционально числу x, то можно также сказать, что число y прямо пропорционально обратной величине числа x, т. е. $\frac{1}{x}$.

ОТДЕЛ ТРЕТИЙ.

ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ФУНКЦИЙ.

Глава первая.

Понятие о функции и координатах.

106. Понятие о функции. Если какая-нибудь величина зависит от некоторой другой величины, то принято говорить, что первая величина есть функция второй (или от второй). Так вес воды, наполняющей какой-нибудь сосуд, конечно, зависит от вместимости этого сосуда (при изменении вместимости изменяется и вес воды); поэтому можно сказать, что этот вес есть функция вместимости сосуда; вес керосина, сгорающего в лампе, есть функция от времени, в течение которого горит лампа; длина хорды, проведенной в круге, есть функция расстояния этой хорды от центра круга, и т. д.

Если величина, от которой другая величина есть функция, может быть изменяема произвольно, то она называется переменной независимой (величиной); сама же функция может быть названа переменной зависимой¹). Если, напр., мы рассматриваем зависимость длины хорды данного круга от ее расстояния от центра, то это расстояние есть величина переменная независимая, а длина хорды, которая есть функция от этого расстояния, представляет собой переменную зависимую. Те величины, которые предполагаются неизменяющимися, называются величинами постоянными. Напр., при исследовании зависимости между длиною хорды круга от ее расстояния от центра мы предполагаем, что длина радиуса этого круга не меняется; тогда эту длину можно рассматривать как постоянную.

---

¹) Переменная независимая называется также аргументом функции.

Функции бывают не только от одной переменной независимой, но и от двух, трех и более. Напр., длина пути, пройденного поездом железной дороги, зависит и от скорости, с какою движется этот поезд, и от времени, в течение которого был пройден путь; значит, длина пути в этом случае есть функция от двух переменных независимых: скорости и времени.

Зависимость между функцией и переменными независимыми часто может быть выражена формулой, связывающей между собою числа, измеряющие эти величины. Так, мы видели, что прямая пропорциональная зависимость выражается формулой: $y=kx$, обратная пропорциональная зависимость выражается формулой: $y=\frac{k}{x}$, и т. п.

Если функция зависит от одного переменного независимого числа (о таких функциях мы и будем теперь говорить), то это число обозначается большею частью буквою x, а сама функция — буквою y. Числа, которые предполагаются постоянными, мы будем обозначать первыми буквами алфавита: a, b, c.

Когда мы рассматриваем зависимость между функцией и переменным независимым числом x, нам важно ясно представлять себе не только то, что функция изменяется при изменении переменного независимого числа, но и то, как происходит это изменение. При этом нет надобности, чтобы функция была задана в виде какого-либо алгебраического выражения; она может быть задана несколькими своими значениями, найденными, положим, из опыта.

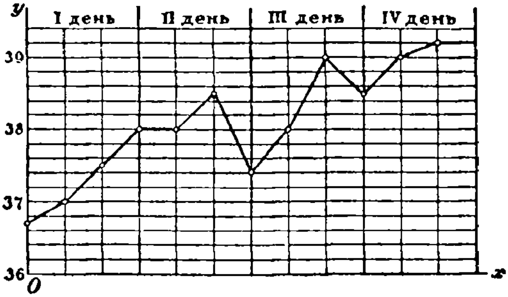
Примеры таких эмпирических (опытных) функций указаны в следующем параграфе.

107. Графики температуры, влажности и пр. При лечении многих болезней доктору очень важно знать, как изменяется температура больного в течение хода болезни. Для этого пользуются особым медицинским термометром Цельсия, на котором проставлены градусы (от 35° до 42°), разделенные на десятые доли. Термометром этим измеряют температуру больного по несколько раз в день, напр. утром, среди дня и вечером, и результаты измерения записывают. Положим, напр.. температура больного за первые 4 дня болезни была следующая:

	1-й день	2-й день	3-й день	4-й день
Утром. . . .	36,7	38	37,4	38,5
Днем	37	38	38	39
Вечером . .	37,5	38,5	39	39,2

Чтобы процесс изменения температуры в зависимости от времени сделать наглядным, прибегнем к графическому его изображению.

Для этого на горизонтальной прямой *Ox* (черт. 16) отложим произвольной длины равные деления, которые будут у нас означать промежутки времени между двумя последовательными измерениями температуры. На другой прямой *Oy*, перпендикулярной *Ox*, также отложим произвольной длины равные деления и условимся, что каждое из них будет соответствовать, положим, 0,2 градуса температуры. Внизу поставим 36° (предполагая, что температура больного не будет ниже 36°), затем через 5 делений 37°, потом снова через 5 делений 38° и т. д. Проведя затем из всех точек, разграничивающих деления, прямые, параллельные линиям *Ox* и *Oy*, мы легко нанесем на полученную таким образом сетку точки, соответствующие наблюденным температурам. Так, на первом слева перпендикуляре возьмем точку, соответствующую (приблизительно) 36,7°, на втором перпендикуляре — точку, соответствующую 37°, и т. д. Проведя через все полученные точки ломаную линию, мы получим **график** (чертеж) температуры больного; этот график наглядно изображает нам процесс изменения температуры за 4 первых дня болезни.

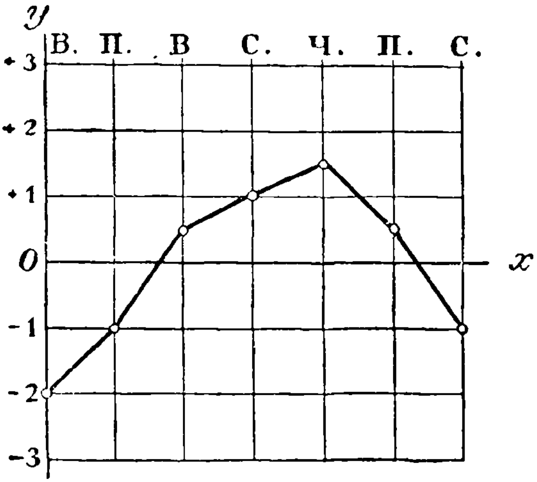


Черт. 16.

В приведенном нами примере температуры больного отрезки, откладываемые на прямых *Ox* и *Oy*, выражались положительными числами. Но иногда бывает необходимо откладывать и отрицательные отрезки. Положим, напр., мы наблюдали температуру наружного воздуха в течение недели ежедневно в полдень и результаты записали в такой таблице:

Воскрес.	Понед.	Вторн.	Среда	Четверг	Пятница	Суббота
— 2°	— 1°	+ $1/2$°	+ 1°	+$1\,1/2$°	+ $1/2$°	— 1°

Чтобы выразить изменение этих температур графиком, придется откладывать температуры — и положительные, и отрицательные. Это можно сделать, если условимся положительные температуры откладывать вверх от точки O, а отрицательные вниз от нее. Тогда мы получим такой график (черт. 17).



Черт. 17.

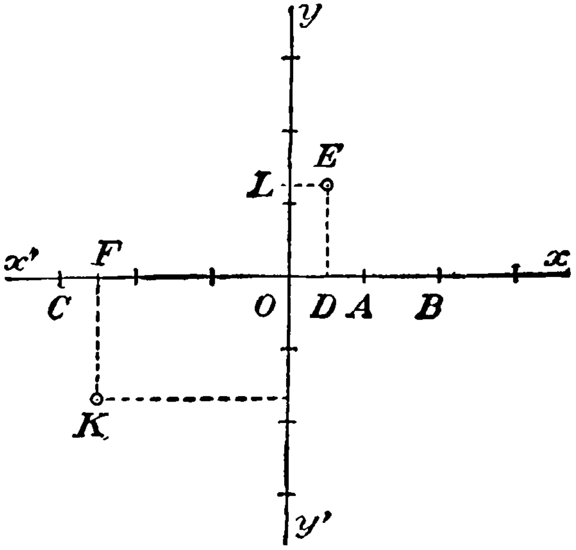
Подобно этому часто составляют графики влажности воздуха, графики атмосферного давления и пр. Существуют даже самопишущие приборы, которые, раз пущенные в ход, сами собой вычерчивают на особой бумаге кривую температуры воздуха или кривую атмосферного давления и т. п.

Мы перейдем теперь к более подробному рассмотрению графического изображения функций; мы увидим при этом, что изображенные на чертеже функции представляются нам значительно яснее, чем мы их представляли себе без чертежа.

Ознакомимся сначала с тем, что называется координатами точки, расположенными где-нибудь на данной плоскости.

108. Координаты точки. Возьмем две взаимно перпендикулярные прямые xx' и yy' (черт. 18), пересекающиеся в точке O. Примем, далее, какой-нибудь отрезок прямой (равный, напр., сантиметру) за единицу длины и условимся откладывать значения переменного независимого числа x на прямой xx', начиная от точки O, как начала, причем положительные значения x будем откладывать вправо от O, а отрицательные — влево от O. Таким образом, отрезок OA выразит нам значение x, равное $+1$, отрезок OB — значение x, равное $+2$, отрезок OC — значение x, равное -3, и т. п. Сама точка O представляет значение, равное нулю. Значения функции y, соответствующие этим значениям x, мы условимся откладывать на прямых, проведенных через точки A, B, C,... параллельно yy' (иначе сказать, на перпендикулярах к прямой xx'), причем положительные значения функции мы будем откладывать вверх от прямой xx', а отрицательные — вниз от нее. Если, напр., при $x = {}^1/_2$ значение функции y будет $+1^1/_4$, то на прямой xx' мы возьмем отрезок $OD = \mp {}^1/_2$, и восстановим перпендикуляр DE, равный $+1^1/_4$; тогда получим точку E, которая выразит нам значение $y = +1^1/_4$ при $x = {}^1/_2$. Равным образом, точка K выразит значение y, равное $-1^3/_4$ при $x = -2^1/_2$, и т. п.

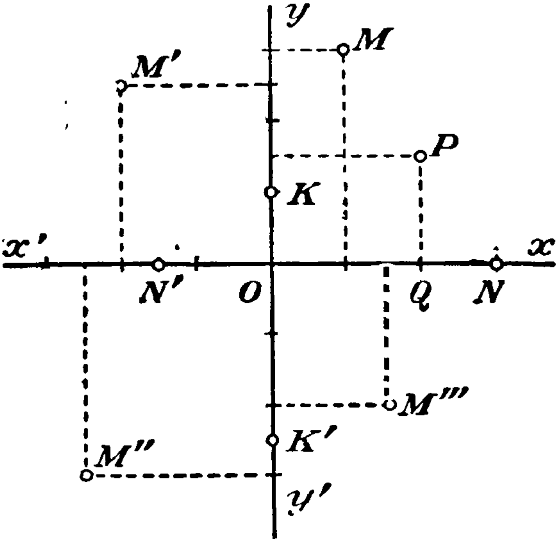
Заметим, что точки E, K,... мы можем получить несколько иначе, а именно, вместо того, чтобы на перпендикулярах DE, FK,. . откладывать отрезки, выражающие значения y, мы можем их откладывать на прямой yy', начиная от точки O, и затем из концов этих отрезков проводить прямые, параллельные xx' до пересечения с соответствующими перпендикулярами. Так, отложив $OL = +1^1/_4$ и проведя $LE \parallel Ox$, мы получим точку E, т. е. ту самую точку, которую раньше мы получили, отложив $DE = +1^1/_4$. То же самое можно сказать о точке K и о всех других подобных точках. Вот почему горизонтальную прямую принято обозначать буквами xx', а вертикальную — буквами yy': на первой откладываются значения переменного независимого числа x, на второй можно откладывать значения функции y.



Черт. 18.

Отрезки OD, OF, ..., откладываемые на прямой xx' и выражающие значения переменного независимого числа x, называются **абсциссами** (OD — абсцисса точки E, OF — абсцисса точки K и т. д.); отрезки DE, FK, ..., откладываемые на перпендикулярах к xx' (или на прямой yy') и выражающие значения функции y, называются **ординатами** (DE — ордината точки E, FK — ордината точки K и т. д); те и другие совместно называются координатами точек E, K.

Неограниченная прямая xx', на которой откладываются абсциссы, называется осью абсцисс или осью x-ов (ось иксов); неограниченная прямая yy', на которой (или параллельно которой) откладываются ординаты, называется осью ординат или осью y-ов (ось игреков); та и другая прямая совместно называются осями координат. Точка O называется началом координат [1].



Черт. 19.

Очевидно, что при данных координатных осях и при данной единице длины каждой паре чисел, принятых за координаты, соответствует на плоскости одна определенная точка. Например, как видно из чертежа 19, следующим парам чисел (1, 3), $(-2,\ 2\frac{1}{2})$, $(-2\frac{1}{2}, -3)$, $(1\frac{1}{2}, -2)$ (принято из двух чисел, поставленных в скобках, первое число принимать за абсциссу, а второе — за ординату) соответствуют точки: M, M', M'', M'''. И, наоборот, каждой точке плоскости соответствует определенная пара чисел, которую можно принять за координаты этой точки. Например, если возьмем какую-нибудь точку P, то, опустив из нее на ось x-ов перпендикуляр PQ и измерив принятой единицей отрезки OQ и PQ, мы получим абсциссу и ординату этой точки (на нашем чертеже у точки P абсцисса оказывается $+2$ и ордината $+1\frac{1}{2}$). Если возьмем точку на оси x-ов, то ордината ее, очевидно, будет нуль, а абсцисса — положительное или отрицательное число, измеряющее ее расстояние от точки O; таковы, например, точки N (3, 0) и N' ($-1^1/_2$, 0). Если точка взята на оси y-ов, то ее абсцисса равна нулю, а ордината есть число, измеряющее ее расстояние от O; таковы, например, точки K (0, $+1$) и K' (0, $-2^1/_2$).

---

[1] Определение положения точки на плоскости посредством двух указанных координат введено было французским математиком *Рене Декартом* (1599 г.— 1650 г.), почему координаты эти называются **декартовыми**.

У начала координат абсцисса и ордината, очевидно, равны нулю.

Покажем теперь, как, пользуясь такими координатами, можно наглядно изобразить изменение данной функции при помощи ее графика. Начнем с самой простой функции.

Глава вторая.

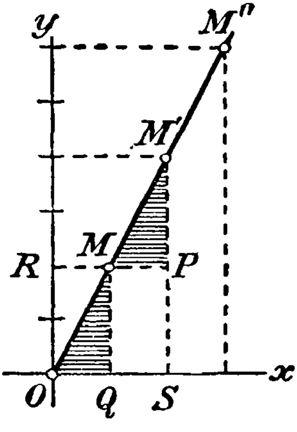
График пропорциональной зависимости (прямой и обратной).

109. График пропорциональной зависимости. Как мы видели (§ 103), пропорциональная зависимость (прямая) выражается формулой $y = kx$, в которой k есть постоянное число (коэффициент пропорциональности). Предположим, что $k = 2$ и мы желаем графически изобразить функцию: $y = 2x$. Для этого дадим переменному числу x какие-нибудь частные значения, например такие: $x = 0$, 1, 2, 3,... и вычислим соответствующие значения функции y. Для ясности расположим те и другие в такой таблице:

x	0	1	2	3	4	5	6	7	...
y	0	2	4	6	8	10	12	14	...

Конечно, мы не можем поместить в таблице всевозможные значения x и y, так как всех значений, очевидно, бесчисленное множество. Однако мы легко можем сообразить, что если x изменяется, положим, от 2 до 3 непрерывно (т. е. переходя через все возможные числа, заключенные между 2 и 3), то y будет изменяться тоже непрерывно (переходя через все возможные числа, заключенные между 4 и 6). Например, при таком изменении числа x функция y может сделаться равной 4,1; для этого нужно только, чтобы число x сделалось равным 4,1 : 2, т. е. 2,05, что непременно произойдет при непрерывном изменении x от 2 до 3. Таким образом, хотя наша таблица содержит только некоторые значения x и y, мы из нее все-таки видим, что когда x получит какое-нибудь значение, промежуточное между указанными в таблице, то и y получит значение, промежуточное между указанными в таблице.

Теперь, начертив координатные оси и выбрав единицу длины (положим OQ, черт. 20), построим точки O, M, M', M'', ..., координатами которых служат значения x и y, помещенные в нашей таблице. Так, O будет точка, имеющая координаты $x = 0$, $y = 0$, точка M имеет координаты $x = 1$, $y = 2$, и т. д. Сколько бы мы таких точек ни построили, все они должны лежать на одной и той же прямой. Для доказательства этого возьмем какие-нибудь 3 соседних точки, например O, M и M', и, соединив прямыми точку O с M и затем точку M с M', покажем, что прямая MM' составляет продолжение прямой OM. Для этой цели проведем MP (продолжение MR) и сравним между собою 2 прямоугольных тр-ка (покрытые штрихами). У них $OQ = MP = 1$ и $MQ = M'P = 2$, и потому тр-ки равны, и, следовательно, $\angle M'MP = \angle MOQ$; поэтому прямая MM' составляет продолжение прямой OM. Значит, три точки O, M и M' лежат на одной прямой. Все сказанное об этих трех точках может быть повторено о всяких других трех соседних точках; значит, все точки должны лежать на одной прямой.



Черт. 20.

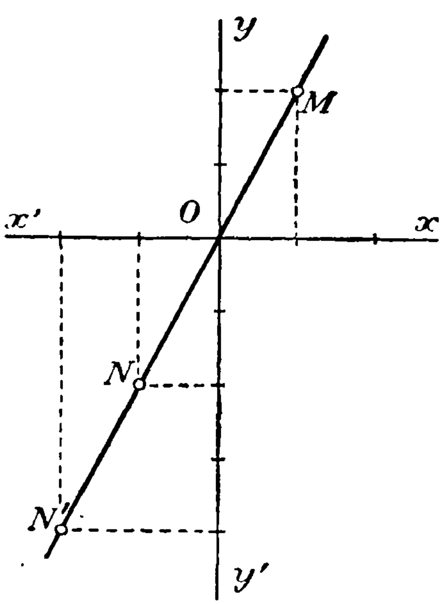
Чтобы сделать доказательство общим, можем рассуждать так. Назначим для x два произвольных числа: $x = a$ и $x = b$; тогда для y получим два соответствующих значения: $y = ka$ и $y = kb$. Пусть (черт. 20) $OQ = a$, $OS = b$, $QM = ka$ и $SM' = kb$. Проведя прямые OM и OM', мы получим два тр-ка OQM и OSM', которые подобны, так как они содержат по равному углу (прямому), лежащему между пропорциональными сторонами ($OQ : OS = a : b$ и $QM : SM' = ka : kb = a : b$). Вследствие этого $\angle MOQ = \angle M'OS$, и потому точки O, M и M' лежат на одной прямой. Таким образом, всякие две точки (M и M'), удовлетворяющие формуле $y = kx$, оказываются лежащими на прямой, проходящей через O.

Итак, *график пропорциональной зависимости* ($y = kx$) *есть прямая, проходящая через начало координат и через точку* (M), *у которой абсцисса есть 1, а ордината равна коэффициенту пропорциональности* (в нашем примере она равна 2).

110. Замечание. Если в функции $y = 2x$ мы будем давать числу x отрицательные значения, например такие:

x	-1	-2	-3	-4	...
y	-2	-4	-6	-8	...

то и для y получим отрицательные значения. Тогда график функции будет прямая ON', расположенная в угле $x'Oy'$ и составляющая продолжение прямой OM, построенной нами раньше (черт. 21).

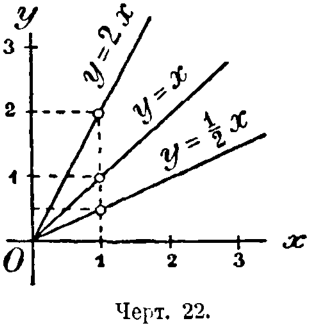


Черт. 21.

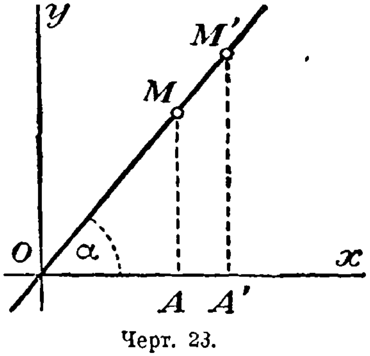
111. Изменение положения прямой в зависимости от коэффициента пропорциональности. Построим еще на одном и том же чертеже (22) прямые, выражающие функции:

$$y=\frac{1}{2}x;\ y=x;\ y=2x,$$

у которых коэффициенты положительные и притом возрастают. Из чертежа мы видим, что по мере возрастания коэффициента пропорциональности прямая отклоняется все более и более от оси x-ов, приближаясь к оси y-ов. Таким образом, коэффициент k в функции $y=kx$ характеризует собою угол, составленный прямою с полуосью Ox; поэтому число k называется также **угловым** коэффициентом прямой, выражающей графически функцию $y=kx$. Так как из этой функции видно, что $k=\frac{y}{x}$, то



Черт. 22.



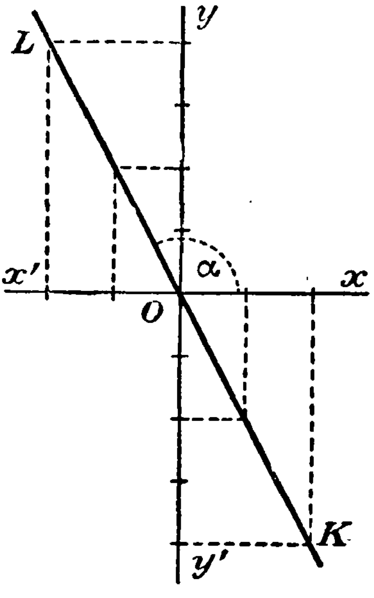
Черт. 23.

можно сказать, что угловой коэффициент равен отношению кого-нибудь значения функции (какой-нибудь ординаты) к ответствующему значению переменного независимого (к соот ствующей абсциссе), так что если функция изображается п мою OM (черт. 23), то

$$k=\frac{MA}{OA}=\frac{M'A'}{OA'}=\ldots=\operatorname{tg}\alpha.$$

(Как известно из геометрии, в прямоугольном тр-ке отношение одного катета к другому катету равняется *тангенсу* угла α, противолежащего первому катету.)

Полезно заметить, что если $k=1$, т. е. если функция имеет вид: $y=x$, то прямая, изображающая ее, есть биссектриса прямого угла xOy (тогда тр-к OAM, черт. 23, равнобедренный, и $\angle\alpha=45^\circ$). Если $k=0$, т. е. если функция имеет вид: $y=0$, то прямая сливается с осью Ox.



Черт. 24.

Положим теперь, что коэффициент k будет отрицательное число, например $y=-2x$. Тогда положительным значениям x будут соответствовать отрицательные значения y, и наоборот:

x	1	2	3	4	...	-1	-2	-3	...
y	-2	-4	-6	-8	...	2	4	6	...

Тогда мы получим прямую KL, расположенную в углах $x'Oy$ и xOy' (черт. 24). В этом случае угол, образованный прямой с полуосью Ox, будет тупой LOx, и тангенс его равен -2.

Значит, когда коэффициент k положительный, тогда прямая подымается вверх (от точки O вправо), когда же коэффициент отрицательный, прямая опускается вниз.

112. График обратной пропорциональности. Такая пропорциональность выражается, как мы видели (§ 105), формулой:

$$y=\frac{k}{x},\quad \text{или}\quad yx=k.$$

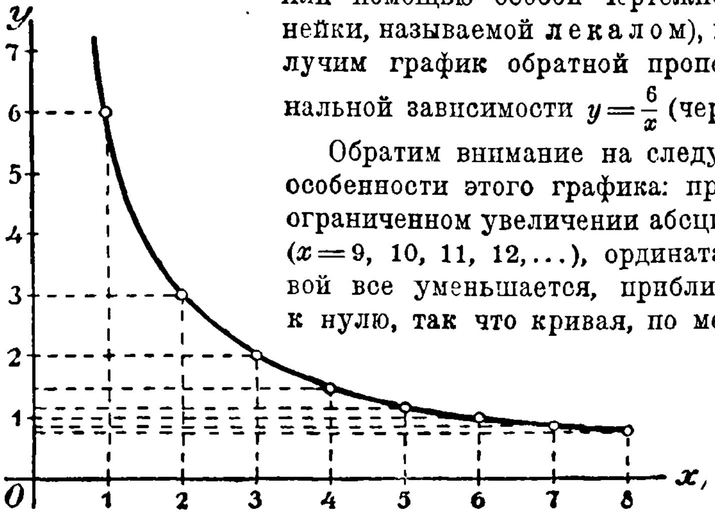
Построим график частного случая, когда $k=6$, т. е. когда функция будет: $y=\frac{6}{x}$.

Составим таблицу значений этой функции, например такую:

x	1	2	3	4	5	6	7	8	...
y	6	3	2	$1^1/_2$	$1^1/_5$	1	$^6/_7$	$^3/_4$	...

По поводу этой таблицы мы и здесь можем сделать такое же замечание, какое делали раньше, когда говорили о графике функции $y=2x$, а именно: если x будет переходить через все возможные значения, промежуточные между указанными в таблице, например через значения, заключающиеся между 1 и 2, то и y будет получать промежуточные значения, заключающиеся между 6 и 3. Например, y может при этом сделаться равным $5^1/_2$; для этого надо только, чтобы число x получило значение, при котором $\frac{6}{x}=5^1/_2$, т. е. чтобы $x=6:5^1/_2=6:{}^{11}/_2={}^{12}/_{11}=1^1/_{11}$, что, конечно, произойдет при непрерывном изменении x от 1 до 2.

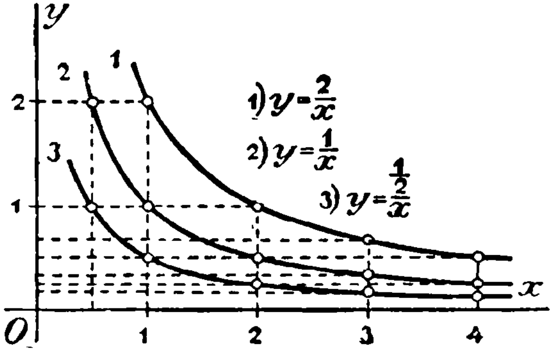
Нанеся значения, указанные в таблице, на чертеж и обведя все полученные на графике точки непрерывной кривой (от руки или помощью особой чертежной линейки, называемой **лекалом**), мы получим график обратной пропорциональной зависимости $y=\frac{6}{x}$ (черт. 25).



Черт. 25.

Обратим внимание на следующие особенности этого графика: при неограниченном увеличении абсциссы x ($x=9$, 10, 11, 12,...), ордината кривой все уменьшается, приближаясь к нулю, так что кривая, по мере ее продолжения направо, все ближе и ближе подходит к оси x-ов, но, однако, никогда ее достигнуть не может (дробь $\frac{6}{x}$ никогда не может сделаться равной нулю). Равным образом, если для x будем брать дроби $^1/_2$, $^1/_4$, $^1/_8$ и т. д., все приближающиеся к нулю, то y будет все более и более возрастать ($y = 12, 24, 48, \ldots$), так что ветвь кривой, при продолжении ее налево, неограниченно подымается вверх, приближаясь в то же время все более и более к оси y-ов, но достигнуть ее никогда не может (при $x=0$ дробь $\frac{6}{x}$ перестает существовать).

Чертеж 26, сделанный в более крупных единицах, чем предъидущий чертеж, представляет три графика функции $y=\frac{k}{x}$ при $k=2$, 1, $^1/_2$. Они имеют те же особенности, как и график предыдущего чертежа, отличаясь друг от друга только большею или меньшею вдавленностью к вершине прямого угла. Вообще, график функции $y=\frac{k}{x}$ есть так называемая гипербола, со свойствами которой мы ознакомимся впоследствии. Заметим, что для таких чертежей всего удобнее брать так называемую канвовую (сетчатую) бумагу, которая равноотстоящими горизонтальными и вертикальными прямыми разделена на малые квадратики (например на квадратные миллиметры; тогда бумага называется миллиметровою). Прямые Ox и Oy надо брать на этой бумаге так, чтобы они совпадали с какими-либо ее прямыми. За единицу длины тогда берут одно или несколько делений бумаги (например на миллиметровой бумаге — миллиметр или сантиметр).



Черт. 26.

Глава третья.

График двучлена первой степени.

113. **Задача.** Длина железного стержня при температуре 0° составляет 1 метр; определить, какая длина l окажется у этого стержня, когда он будет нагрет до $t°$, если известно, что с каждым градусом нагревания длина стержня увеличивается на 0,000012 той длины, которую стержень имеет при 0°.

При нагревании на один градус длина стержня, равная при 0° одному метру (= 100 *см*), должна увеличиться на 100·0,000012 *см*, т. е. 0,0012 *см*. Удлинение при нагревании на t° должно быть в t раз более, чем при нагревании на один градус; поэтому все удлинение будет 0,0012 t *см*. Приложив это удлинение к начальной длине стержня (при 0°), т. е. к 100 *см*, получим длину при температуре t:

$$l = 100 + 0{,}0012\,t \ (\text{см}).$$

Если температуру t, до которой нагрет стержень, будем рассматривать как переменную величину, то длину l мы можем рассматривать как функцию температуры. Обозначая, по общепринятому, переменную независимую величину через x, а функцию буквою y, мы можем зависимость между длиною стержня и его температурой выразить такою формулой:

$$y = 100 + 0{,}0012\,x.$$

114. Двучлен первой степени. Алгебраическое выражение, представляющее собою двучлен, в котором один член содержит переменное число (в первой степени), а другой член есть число постоянное, называется двучленом первой степени. В приведенной выше задаче длина стержня выражается двучленом первой степени относительно температуры. Функции такого рода часто встречаются при решении многих задач и вопросов. Общий вид двучлена первой степени может быть выражен так:

$$y = ax + b,$$

где буквы a и b обозначают постоянные числа, положительные или отрицательные (иногда и нуль), а x — переменное число способное принимать всевозможные численные значения; буква y означает величину самого двучлена, соответствующую взятой величине x.

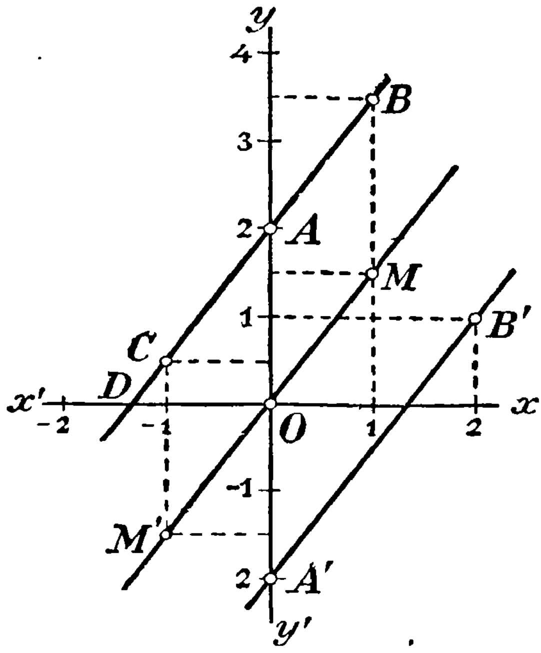
Корнем двучлена называется то значение переменного числа x, при котором двучлен обращается в нуль. Чтобы найти такое значение, надо приравнять двучлен нулю и решить получившееся от этого уравнение. Так, корень двучлена $1^1/_2\,x + 2$ получится, если решим уравнение $1^1/_2\,x + 2 = 0$:

$$1^1/_2\,x = -2; \quad x = -2 : 1^1/_2 = -{}^4/_3 = -1^1/_3.$$

115. График двучлена первой степени. Возьмем какой-нибудь частный случай двучлена, например:

$$y = 1^1/_2 x + 2.$$

Отбросим пока число 2 и возьмем более простую функцию $y = 1^1/_2 x$. Функция эта выражает пропорциональную зависимость между y и x и потому графически изобразится, как мы знаем (§ 109), прямою (черт. 27), проходящею через начало координат и через точку *M*, у которой абсцисса есть 1, а ордината $1^1/_2$. Если переменному числу x будем давать не только положительные значения, но и отрицательные, то прямая эта продолжится вниз, проходя через точку *M'*, у которой абсцисса есть -1 и ордината $-1^1/_2$. Если теперь восстановим отброшенное прежде число $+2$, т. е. возьмем функцию $y = 1^1/_2 x + 2$, то увидим, что все ординаты этой функции будут более соответственных ординат функции $y = 1^1/_2 x$ на 2 единицы. Значит, график функции $y = 1^1/_2 x + 2$ мы получим из графика функции $y = 1^1/_2 x$, если прямую линию *MM'* перенесем параллельно самой себе вверх на 2 единицы. Для этого отложим на оси Oy отрезок $OA = 2$ и через точку *A* проведем прямую, параллельную *MM'*. Эта прямая и будет служить графиком функции $y = 1^1/_2 x + 2$. Абсцисса OD точки, в которой эта прямая пересекается с осью x-ов, равна корню двучлена, так как при этой абсциссе ордината y (т. е. величина самого двучлена) равна нулю (на нашем чертеже $OD = -1^1/_3$).



Черт. 27.

Если возьмем функцию

$$y = 1^1/_2 x - 2,$$

то отрезок OA пришлось бы отложить вниз от точки O, так как тогда все ординаты функции $y = 1^1/_2$ пришлось бы уменьшить на 2 единицы. Мы получили бы тогда прямую $A'B'$, параллельную MM' и отсекающую от оси y-ов отрезок $OA' = -2$. Корень этого двучлена равен абсциссе OE точки, в которой прямая $A'B'$ пересекается с осью x-ов (на чертеже $OE = +1^1/_3$).

Если в функции $y = ax + b$ коэффициент a будет число отрицательное (например $y = -1^1/_2 x + 2$), то вспомогательная прямая, выражающая график функции $y = -1^1/_2 x$, пройдет через углы $x'Oy$ и xOy', сообразно чему изменится и направление прямой BC.

Таким образом, *график двучлена* $y = ax + b$ *есть прямая линия, параллельная прямой, выражающей функцию* $y = ax$, *и отсекающая от оси y-ов отрезок, равный* b.

Вследствие того, что график функции $y = ax + b$ есть прямая линия, сама эта функция называется **линейной**.

Для краткости речи в дальнейшем изложении вместо того, чтобы говорить: „прямая, выражающая функцию $y = ax + b$“, мы будем говорить короче: „прямая $y = ax + b$“.

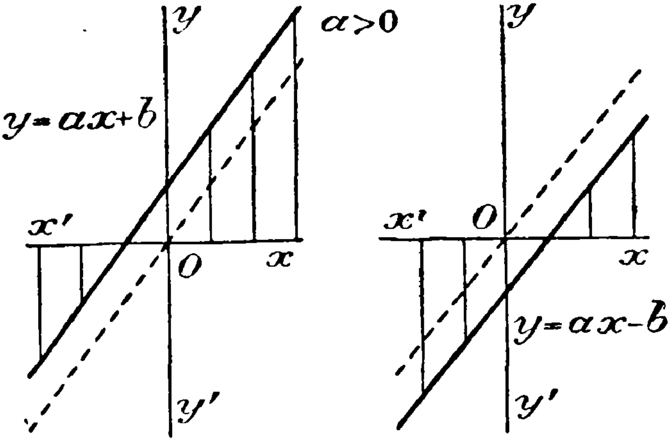
Угол, образуемый прямою $y = ax + b$ с осью x-ов, равен, конечно, углу, составляемому с осью x-ов прямою $y = ax$; следовательно, этот угол зависит только от величины коэффициента a, и поэтому коэффициент этот и в общем виде двучлена $ax + b$ называется **угловым**.

Число b в двучлене $ax + b$ есть так называемая **начальная ордината**, соответствующая начальному значению $x = 0$; она представляет собою отрезок оси y-ов, отсекаемый прямой, выражающей двучлен.

Коэффициент a, как мы видели (§ 111), равен тангенсу угла, образованного с положительным направлением оси x-ов прямою $y = ax$ (и, следовательно, параллельною ей прямою $y = ax + b$).

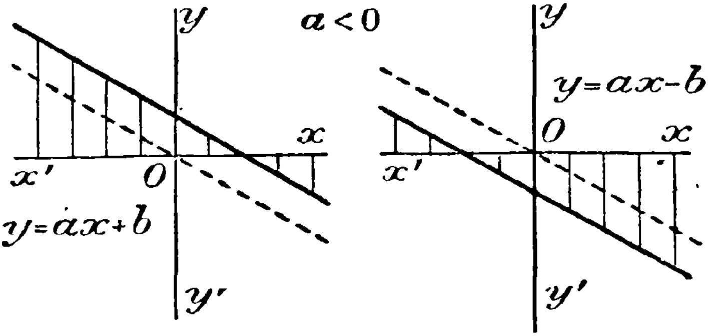
116. Изменение двучлена $y = ax + b$ с изменением x. Прямая $y = ax$, параллельно которой проводится прямая $y = ax + b$, проходит через углы xOy и $x'Oy'$, если $a > 0$, и через углы $x'Oy$ и xOy', если $a < 0$ (§§ 109, 110). Следовательно, в первом случае прямая $y = ax + b$, если рассматривать ее в направлении слева направо, подымается вверх (черт. 28), а во втором случае она опускается вниз (черт. 29).

Если примем во внимание, что отрицательные числа тем больше, чем меньше их абсолютные величины, то мы можем сказать, что при возрастании абсциссы x (например, когда x переходит через ряд значений: $\ldots -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4 \ldots$) ординаты возрастают, если $a > 0$ (черт. 28), и убывают, если $a < 0$



Черт. 28.

(черт. 29), причем это возрастание или убывание безгранично (конечно, если представлять себе прямые продолженными в обе стороны бесконечно) и притом равномерно, т. е. с уве-

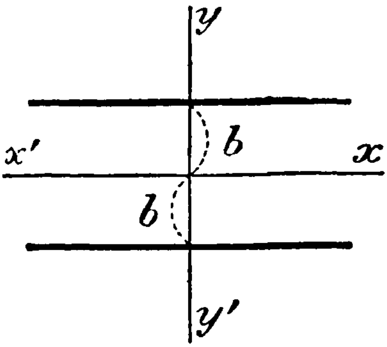


Черт. 29.

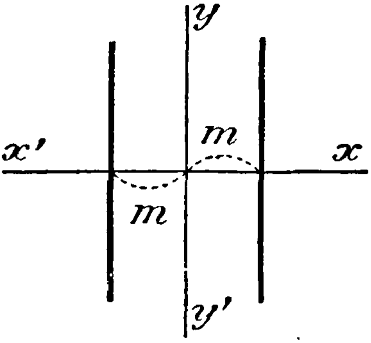
личением x на одно и то же число (положим, на m) функция возрастает или убывает также на одно и то же число (положим, на n).

117. Замечания. I. Если угловой коэффициент a равен нулю, тогда двучлен обращается в одночлен $y = b$. Это значит, что в графическом изображении должна получиться такая прямая, у которой все точки имеют одну и ту же ординату, равную b, а абсцисса может быть какая угодно. Такая линия, очевидно, есть прямая, параллельная оси x-ов и отсекающая от оси y-ов отрезок, равный b. Значит, при b положительном эта прямая расположится над осью x-ов, а при b отрицательном — под нею (черт. 30); и в том и в другом случае при изменении x функция остается постоянной (равной b).

В частности, если при $a = 0$ еще и $b = 0$, т. е. если линейная функция будет $y = 0$, то график функции будет ось x-ов



Черт. 30.



Черт. 31.

(для всякой точки этой оси ордината $y = 0$, а абсцисса произвольная).

II. Если какая-нибудь прямая параллельна оси y-ов (черт. 31), то тогда ординаты точек этой прямой могут иметь произвольные значения, абсциссы же для всех точек одинаковы, а именно: равны положительному или отрицательному отрезку m, который отсекается прямою от оси x-ов. Следовательно, такую прямую можно выразить уравнением так: $x = m$ (ордината y, не входящая в уравнение, остается произвольной). В частности, если $m = 0$, то получается уравнение $x = 0$, выражающее, что абсцисса всякой точки есть 0, а ордината какая угодно. Такая прямая есть ось y-ов.

118. Построение прямой $y = ax + b$ по двум точкам. Чтобы построить прямую $y = ax + b$, можно было бы сначала построить вспомогательную прямую, выражающую функцию $y = ax$, и потом провести параллельную прямую, отсекающую от оси y-ов отрезок b. Но проще построить прямую $y = ax + b$, найдя предварительно какие-нибудь две точки этой прямой. Положим, например, надо построить прямую:

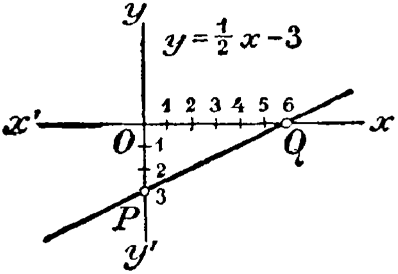
$$y=\frac{1}{2}x-3.$$

Для этого найдем координаты каких-нибудь двух точек, принадлежащих искомой прямой, например, координаты тех точек, в которых прямая пересекается с осями координат. Для нахождения их положим в данном уравнении $x=0$ и определим соответствующее значение y, а затем положим $y=0$ и определим x; тогда найдем:

1) если $x=0$, то $y=-3$;

2) если $y=0$, то $^1/_2 x-3=0$ и $x=6$.

Точка с абсциссой 0 и ординатой 3 есть точка P (черт. 32); точка с абсциссой 6 и ординатой 0 есть Q; значит, искомый график будет прямая PQ, проходящая через эти две точки.



Черт. 32.

Если точки пересечения с координатными осями (или одна из них) не помещаются в пределах чертежа, то можно подыскать другие точки, которые помещались бы на чертеже.

Замечание. Для уменьшения погрешности при черчении прямой желательно, чтобы две точки, через которые проводится прямая, отстояли друг от друга по возможности дальше, тогда некоторая неточность в положении линейки (избегнуть которую очень трудно) не так много отразится на направлении проводимой прямой.

119. Графическое решение уравнения. Пусть требуется решить графическим путем уравнение:

$$3x-1{,}5=x+3{,}5.$$

Укажем два способа такого решения.

Способ 1-й. Перенеся все члены в левую часть, сделаем приведение подобных членов:

$$3x-1{,}5-x-3{,}5=0;\quad 2x-5=0.$$

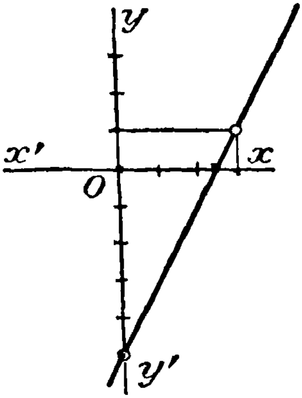
В таком виде уравнением требуется найти такое значение числа x, при котором двучлен $2x-5$ обращается в нуль; друими словами, требуется найти корень этого двучлена. Для этого, как мы видели, достаточно построить график двучлена и найти на чертеже величину абсциссы той точки, в которой график пересекается с осью x-ов. График двучлена

$$y = 2x - 5$$

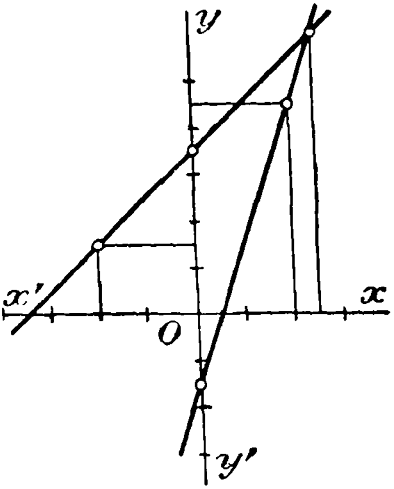
есть прямая линия, которую мы можем построить по двум точкам, например таким:

$$1)\ x = 0,\quad y = -5;$$

$$2)\ x = 3,\quad y = 1.$$



Черт 33.



Черт. 34.

На чертеже (черт. 33) мы получили прямую, которая пересекается с осью x-ов в точке с абсциссой $+2^1/_2$; это и будет корень уравнения $2x - 5 = 0$.

Способ 2-й. Части данного уравнения, взятые отдельно, представляют собою два двучлена:

$$y_1 = 3x - 1{,}5 \quad \text{и} \quad y_2 = x + 3{,}5.$$

Уравнение требует найти такое значение числа x, при котором оба двучлена имели бы одинаковую численную величину. Для нахождения такого значения построим на одном и том же чертеже графики обоих двучленов, например по таким точкам:

$$y_1 = 3x - 1,5 \quad \begin{cases} x = 0 \\ y_1 = -1,5 \end{cases} \quad \begin{array}{|l} x = 2 \\ y_1 = 4,5 \end{array}$$

$$y_2 = x + 3,5 \quad \begin{cases} x = 0 \\ y_2 = 3,5 \end{cases} \quad \begin{array}{|l} x = -2 \\ y_2 = 1,5. \end{array}$$

Две построенные по этим точкам прямые (черт. 34) пересекаются в точке, абсцисса которой составляет $+2^1/_2$. Это и будет корень данного уравнения, так как при $x = 2^1/_2$ ординаты y_1 и y_2 равны между собою и, следовательно, $3x - 1,5 = x + 3,5$

Замечание. Графический способ решения уравнений первой степени не представляет каких-либо преимуществ с алгебраическим приемом решения, так как такие уравнения решаются весьма просто и без графиков. Но для решения уравнений более сложных графический метод иногда бывает весьма полезен (впоследствии мы увидим этому примеры).

ОТДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УРАВНЕНИЯХ. НЕРАВЕНСТВА.

Глава первая.

Пересмотр двух основных свойств уравнения.

120. Предварительное разъяснение. Всякое уравнение, как мы знаем, есть такое равенство, у которого обе части имеют одинаковую численную величину не при всяких значениях букв, входящих в это равенство, а только при некоторых, которые в таком случае называются корнями (или решениями) уравнения. Уравнение с одним неизвестным может иметь один корень, два корня и более; например, уравнение $3x-2=13$ имеет один корень (5), уравнение $x^2+2=3x$ имеет два корня (1 и 2), уравнение $(x-1)(x-2)(x+1)=0$ имеет 3 корня (1, 2 и -1)[1] и т. п. Может даже случиться, что уравнение совсем не имеет корня. Таково, например, уравнение $x^2=-4$; какое бы положительное или отрицательное число мы ни подставили на место x, квадрат этого числа не может равняться отрицательному числу -4.

Два уравнения называются равносильными, *если они имеют* *наковые корни*[2]. Например, два уравнения

$$x^2+2=3x \quad \text{и} \quad 3x-2=x^2$$

носильны, так как у них одни и те же корни, именно 1 и 2; внения же

$$7x=14 \quad \text{и} \quad x^2+2=3x$$

---

[1] Вспомним, что если какой-нибудь сомножитель равен нулю, то и произве- ние равно нулю.

[2] При одинаковой их кратности (см. выноску к § 219).

неравносильны, так как первое имеет только один корень 2, тогда как второе, кроме этого корня, имеет еще особый корень 1.

Когда, решая какое-нибудь уравнение, мы совершаем над ним некоторые преобразования (перенесение членов, приведение подобных членов и пр.), то этими преобразованиями мы заменяем данное уравнение последовательно другими, более простыми, до тех пор, пока не получим уравнения самого простого вида: $x=a$; тогда мы говорим, что это число a и есть корень данного уравнения. Но утверждать это безошибочно мы можем только тогда, когда у нас есть уверенность, что все уравнения, полученные при преобразованиях, равносильны данному уравнению; когда мы, например, уверены, что не может быть такого случая, что данное уравнение имеет два корня, а мы нашими преобразованиями пришли к уравнению, имеющему только один корень.

Все преобразования, которые нам приходилось совершать над уравнениями, основаны на двух свойствах уравнения, указанных нами в начале алгебры (§ 39). Рассмотрим теперь эти свойства подробнее с целью определить, не может ли применение этих свойств нарушить когда-либо равносильность уравнений.

121. Первое из указанных свойств уравнений. Возьмем какое-нибудь уравнение, например такое:

$$x^2+2=3x. \qquad (1)$$

Положим, что к обеим частям этого уравнения мы прибавили какое-нибудь одно и то же число m (положительное или отрицательное, или даже нуль); тогда мы получим новое уравнение:

$$x^2+2+m=3x+m. \qquad (2)$$

Разъясним, что это уравнение равносильно данному. Для этого достаточно убедиться, во-первых, в том, что всякий корень уравнения (1) удовлетворяет и уравнению (2); и, во-вторых, обратно, в том, что всякий корень уравнения (2) удовлетворяет и уравнению (1).

a) Пусть уравнение (1) имеет какой-нибудь корень, например $x=1$. Это значит, что когда в это уравнение на место x подставим 1, то выражение x^2+2 сделается равным выражению $3x$ (каждое из этих выражений обратится в число 3). Но тогда при $x=1$ суммы x^2+2+m и $3x+m$ сделаются равными, так как если к равным числам (3 и 3) прибавим равные числа (m и m), то и получим равные числа ($3+m$ и $3+m$) Значит, корень $x=1$ должен быть также и корнем уравнения (2). Если уравнение (1) имеет еще какой-нибудь корень, то о нем можно сказать то же самое, что сейчас мы говорили о корне $x=1$, т. е. что он удовлетворяет и уравнению (2). Таким образом, **каждый** корень уравнения (1) принадлежит и уравнению (2).

б) Допустим, что уравнение (2) имеет какой-нибудь корень (например $x=2$). Это значит, что если в это уравнение на место x подставим 2, то выражение x^2+2+m сделается равным выражению $3x+m$ (именно, каждое из этих выражений обратится в число $6+m$). Но тогда при $x=2$ и выражения x^2+2 и $3x$ сделаются равными, так как, если от равных чисел ($6+m$ и $6+m$) отнимем равные числа (m и m), то и получим равные числа. Значит, $x=2$ есть также корень и уравнения (1). Если бы уравнение (2) имело еще какой-нибудь корень, то о нем можно было бы повторить то же самое, что мы сейчас сказали о корне $x=2$, т. е. что и этот другой корень должен удовлетворять и уравнению (1).

Значит, **всякий** корень уравнения (2) должен быть и корнем уравнения (1).

Если же корни уравнений (1) и (2) одни и те же, то уравнения эти равносильны. Свойство это относится и к вычитанию из частей уравнения одного и того же числа, так как вычитание какого-нибудь числа равносильно прибавлению другого числа с противоположным знаком.

Таким образом, *если к обеим частям уравнения прибавим, или от них вычтем, одно и то же число, то получим новое уравнение, равносильное первому.*

На этом свойстве, как мы видели (§ 41), основано перенесение членов уравнения из одной части в другую с переменою знака. Теперь мы убеждаемся, что такое перенесение никогда не может нарушить равносильности уравнений.

122. Второе свойство уравнений. Возьмем то же самое уравнение

$$x^2+2=3x \qquad (1)$$

и умножим обе его части на какое-нибудь число m, положительное или отрицательное, но только не на нуль. Тогда получим новое уравнение:

$$(x^2+2)m=3xm. \qquad (2)$$

Чтобы обнаружить равносильность этих двух уравнений, будем рассуждать совершенно так же, как мы рассуждали относительно первого свойства, а именно, покажем, во-первых, что всякий корень уравнения (1) удовлетворяет уравнению (2) и, во-вторых, обратно, что всякий корень уравнения (2) удовлетворяет уравнению (1).

а) Пусть уравнение (1) имеет какой-нибудь корень, например $x=1$. Это значит, что когда в это уравнение на место x подставим 1, то выражение x^2+2 сделается равным выражению $3x$ (каждое из этих выражений обратится в число 3). Но тогда при $x=1$ и произведения $(x^2+2)m$ и $3xm$ сделаются равными, так как если равные числа (3 и 3) умножим на одно и то же число (m), то и получим равные числа ($3m$ и $3m$). Значит, корень $x=1$ должен быть также и корнем уравнения (2). Так как все это можно повторить о всяком ином корне уравнения (1), то заключаем, что всякий корень уравнения (1) принадлежит и уравнению (2).

б) Обратно, пусть уравнение (2) имеет какой-нибудь корень (например $x=2$). Это значит, что если в это уравнение на место x подставим 2, то произведения (x^2+2) и $3xm$ сделаются равными (каждое из них обратится в число $6m$). Но тогда при $x=2$ и выражения x^2+2 и $3x$ сделаются равными, так как если равные числа ($6m$ и $6m$) разделим на равные числа (m и m), то и получим равные числа (6 и 6). Значит, всякий корень уравнения (2) должен быть и корнем уравнения (1). Таким образом уравнения (1) и (2) имеют одни и те же корни, т. е. они равносильны.

Если бы число m было нуль, то после умножения мы не получили бы равносильного уравнения. Например, уравнение x^2+ $+2=3x$ имеет 2 корня: 1 и 2, когда же умножим обе его части на 0, то получим новое уравнение:

$$(x+2)\cdot 0=3x\cdot 0,$$

которое имеет бесчисленное множество произвольных корней, так как произведение всякого числа на нуль равно нулю. Если, например, положим, что $x=10$, то найдем: $(10^2+2)\cdot 0=$ $=3\cdot 10\cdot 0$, т. е. $102\cdot 0=30\cdot 0$ или $0=0$; приняв $x=20$, получим: $(20^2+2)\cdot 0=3\cdot 20\cdot 0$, т. е. $402\cdot 0=60\cdot 0$, или $0=0$, и т. д.

Значит, от умножения частей уравнения на 0 уравнение перестает существовать, обращаясь в очевидное тождество: $0=0$.

Деление обеих частей уравнения на число, отличное от нуля, также ведет к равносильному уравнению, так как деление есть то же умножение, только на обратное число. Что же касается деления на нуль, то такое деление невозможно (§ 33).

Таким образом, *если обе части уравнения умножим, или разделим, на одно и то же число,* отличное от нуля, *то получим новое уравнение равносильное первому.*

123. Умножение или деление частей уравнения на одно и то же алгебраическое выражение. Иногда случается, что мы умножаем (или делим) части уравнения на одно и то же алгебраическое выражение. В этом случае надо задаться вопросом, не может ли это выражение при некоторых значениях букв обратиться в нуль. Если случится, что такие значения букв существуют, то при этих значениях нельзя умножать (или делить) части уравнения на наше алгебраическое выражение. Если мы об этом исключении забудем, то можем иногда впасть в ошибку. Приведем резкий пример такой ошибки.

Пусть нам дано равенство: $a=b$. Преобразуем это равенство таким образом: умножим обе его части на a, предполагая, что a (следовательно, и b) не равно 0. Тогда получим:

$$a^2=ab.$$

Вычтем из обеих частей этого равенства по b^2; получим:

$$a^2-b^2=ab-b^2,$$

что можно переписать так:

$$(a+b)(a-b)=b(a-b).$$

Разделив теперь обе части равенства на $a-b$, получим:

$$a+b=b, \text{ т. е. } 2b=b$$

(так как $a=b$) и, следовательно (по разделении обеих частей на b), $2=1$. Этот нелепый вывод получился от того, что мы разделили обе части равенства на $a-b$, не обратив внимания на то, что эта разность при нашем задании ($a=b$) есть нуль, а на нуль делить невозможно.

124. Посторонние корни. Умножать обе части уравнения на одно и то же алгебраическое выражение приходится, между прочим, тогда, когда мы решаем уравнение, содержащее дроби, в знаменатели которых входит неизвестное. Пусть, например, надо решить уравнение:

$$\frac{x^2}{(x-2)^2}+\frac{2}{(x-2)^2}=\frac{1}{x-2}+\frac{2x+2}{(x-2)^2}. \qquad (1)$$

Общий знаменатель всех дробей есть, очевидно, $(x-2)^2$. Приведя все члены к этому знаменателю:

$$\frac{x^2}{(x-2)^2}+\frac{2}{(x-2)^2}=\frac{x-2}{(x-2)^2}+\frac{2x+2}{(x-2)^2},$$

отбросим его, т. е., другими словами, умножим все члены на $(x-2)^2$:

$$x^2+2=x-2+2x+2,$$

т. е.

$$x^2+2=3x. \tag{2}$$

Мы получили уравнение второй степени. Как решаются такие уравнения, мы увидим впоследствии; но полученное нами уравнение настолько просто, что мы легко можем сообразить, что оно имеет два корня: 1 и 2. Если это уравнение (2) равносильно данному уравнению (1), то тогда и уравнение (1) должно иметь те же корни 1 и 2. Но заранее ручаться за равносильность этих двух уравнений мы не можем, так как для перехода от уравнения (1) к уравнению (2) нам пришлось обе части первого уравнения умножить на алгебраическое выражение $(x-2)^2$, которое при $x=2$ обращается в нуль, а при умножении на нуль равносильность уравнений может нарушиться. Значит, надо испытать значение $x=2$. Подставив это значение в данное уравнение, находим, что оно принимает невозможный вид:

$$\frac{4}{0}+\frac{2}{0}=\frac{1}{0}+\frac{6}{0}$$

(деление на нуль невозможно).

Таким образом, корень $x=2$ является посторонним для данного уравнения.

Мы видим таким образом, что если в данном уравнении имеются дроби, знаменатели которых содержат неизвестное, и мы освободились от этих знаменателей, умножив обе части уравнения на общий знаменатель, то, найдя корни полученного уравнения, мы должны еще подстановкой испытать их, с целью определить, нет ли среди корней посторонних.

Замечание. При делении частей уравнения на алгебраическое выражение, содержащее неизвестное, мы можем иногда потерять корень, именно то значение неизвестного (одно или несколько), при котором это выражение обращается в нуль. Пусть, например, дано уравнение:

$$x^2 - 1 = (5 - x)(x - 1).$$

Разложив его левую часть на два множителя, мы можем уравнение представить так:

$$(x - 1)(x + 1) = (5 - x)(x - 1).$$

Легко сообразить, что это уравнение имеет два корня: $x = 1$ и $x = 2$. Если же разделим обе части уравнения на $x - 1$, то получим новое уравнение: $x + 1 = 5 - x$, которое имеет только один корень $x = 2$. Значит, от деления на $x - 1$ мы потеряли корень $x = 1$, именно тот, который обращает в нуль разность $x - 1$.

Глава вторая.

Решения положительные, отрицательные, нулевые и другие.

125. Общий вид уравнения первой степени с одним неизвестным. Положим, что мы упростили уравнение с одним неизвестным, выполнив следующие преобразования: раскрыли скобки; освободились от знаменателей; перенесли неизвестные члены в левую часть уравнения, а известные — в правую и сделали приведение подобных членов. Если после этого в левой части окажется только член с неизвестным x в первой степени, то такое уравнение называется уравнением первой степени с одним неизвестным. Значит, общий вид такого уравнения есть следующий:

$$ax = b,$$

где a и b могут быть числами и положительными, и отрицательными, и равными нулю.

Рассмотрим, какого рода решения получает это уравнение при различных численных значениях букв a и b.

126. Положительное решение. Такое решение получается тогда, когда числа a и b оба положительны или оба отрицательны. Пусть, напр., $3x = 6$ или $-3x = -6$. Тогда мы получим (разделив обе части уравнения на коэффициент при неизвестном):

$$x = \frac{6}{3} = 2 \text{ или } x = \frac{-6}{-3} = 2.$$

Положительное решение, удовлетворяя уравнению, вместе с тем удовлетворяет и той задаче, из условий которой это уравнение выведено, если только в уравнении выражены все условия данной задачи. Но иногда может случиться, что не все условия задачи выражены в уравнении; тогда положительное решение, удовлетворяя уравнению, может иногда и не удовлетворить задаче. Приведем этому пример.

Задача. Рабочий кружок, состоящий из 20 человек взрослых и подростков, устроил сбор на покупку книг для библиотеки, причем каждый взрослый внес по 3 руб., а каждый подросток по 1 руб. Сколько было в этом кружке взрослых и сколько подростков, если весь сбор составил 55 руб.?

Обозначим число взрослых буквой x; тогда число подростков будет $20-x$, и сбор со взрослых окажется $3x$ руб., а с подростков $20-x$ руб. Согласно условию задачи получим уравнение:

$$3x+(20-x)=55,$$

откуда

$$x=17^1/_2.$$

Это положительное решение, конечно, удовлетворяет уравнению, но не удовлетворяет задаче, так как по смыслу ее искомое число должно быть целым. Различие между уравнением и задачею произошло здесь от того, что уравнение не содержит в себе подразумеваемого в задаче требования, чтобы искомое число было целым. Предложенная задача оказывается невозможной.

127. Отрицательное решение. Такое решение получается из уравнения $ax=b$ тогда, когда числа a и b имеют противоположные знаки. Пусть, напр., $5x=-15$, или $-5x=15$; тогда $x=\frac{-15}{5}=-3$, или $x=\frac{15}{-5}=-3$.

Отрицательное решение надо понимать в смысле противоположном тому, в каком понимается положительное решение; напр., если положительное решение означало бы прибыль, выигрыш, время в будущем и пр., то отрицательное решение должно означать убыток, проигрыш, время в прошедшем и т. п. Если же случится, что по смыслу задачи неизвестное число x нельзя понимать в двух противоположных смыслах, то тогда отрицательное решение означает просто невозможность задачи.

Задача. Какое число надо приложить к числителю и знаменателю дроби $^{13}/_{17}$, чтобы получить дробь, равную $^3/_4$?

Обозначив искомое число буквой x, получим уравнение:

$$\frac{13+x}{17+x}=\frac{3}{4}.$$

Так как это уравнение представляет собой пропорцию, то

$$(13+x)\cdot 4=(17+x)\cdot 3;\ \text{значит: } 52+4x=51+3x,$$

откуда:

$$4x-3x=51-52=-1,\ \text{т. е. } x=-1.$$

Но приложить -1 это все равно, что отнять 1. Значит, получившееся отрицательное решение дает ответ на такую задачу: какое число надо отнять от числителя и знаменателя дроби $^{13}/_{17}$, чтобы получить дробь, равную $^{3}/_{4}$; в нашем примере надо отнять по 1.

128. Нулевое решение. Положим, что в уравнении $ax=b$ число b окажется нулем, а коэффициент a будет какое-нибудь число, отличное от нуля. Пусть, напр., уравнение будет: $4x=0$. Значит, уравнение требует, чтобы произведение $4x$ равнялось нулю. Но произведение равняется нулю только тогда, когда какой-нибудь сомножитель равен нулю; следовательно, сомножитель x должен равняться нулю. И из формулы $x={}^{0}/_{4}$ видно, что $x=0$.

Нулевое решение, удовлетворяя уравнению, вообще удовлетворяет и задаче.

Задача. Какое число надо приложить к числителю и знаменателю дроби $^{13}/_{26}$, чтобы получить $^{1}/_{2}$?

Обозначив искомое число буквой x, мы получим уравнение

$$\frac{13+x}{26+x}=\frac{1}{2},$$

откуда

$$26+2x=26+x;\quad x=0.$$

Это значит, что данная дробь сама равна $^{1}/_{2}$.

129. Случай, когда уравнение не имеет корня. Пусть в уравнении $ax=b$, число a окажется нулем, а число b не равно нулю; напр. $0\cdot x=10$. Такое равенство невозможно, так как какое бы число мы ни взяли для x, произведение $0\cdot x$ равно нулю, а не 10.

Если бы мы, не заметив, что $a=0$, разделили обе части уравнения на a, то получили бы для x такую формулу: $x=\frac{b}{a}$.

Обнаружив затем, что $a=0$, мы из этой формулы нашли бы:

$$x=\frac{b}{0}.$$

Так как такое равенство не имеет смысла (деление на нуль невозможно), то мы пришли бы к заключению, что уравнение при этих условиях не имеет корня, и, следовательно, задача, из условий которой составлено это уравнение, невозможна.

130. Как можно понимать равенство: $x=\frac{b}{0}$. Если в уравнении $ax=b$ коэффициент a не равен нулю, а только близок к 0, то для x получается дробь: $x=\frac{b}{a}$. Зададимся вопросом, как изменяется величина этой дроби, если знаменатель ее все более и более приближается к нулю, а числитель остается неизменным. Предположим сначала, что числа a и b оба положительные. Возьмем для знаменателя a такие, напр., уменьшающиеся значения:

$$a=\frac{1}{10};\quad a=\frac{1}{100};\quad a=\frac{1}{1\,000};\quad a=\frac{1}{10\,000};\ \text{и т. д.}$$

Тогда дробь $\frac{a}{b}$ получит такие возрастающие выражения:

$$\frac{b}{{}^1/_{10}}=10b;\qquad \frac{b}{{}^1/_{100}}=100b;\qquad \frac{b}{{}^1/_{1\,000}}=1000b;\ \text{и т. д.}$$

Отсюда видим, что при неограниченном уменьшении знаменателя a дробь $\frac{b}{a}$ может превзойти любое данное число, как бы велико оно ни было (лишь бы только числитель b оставался без изменения).

Вспомним, что это свойство дроби мы уже видели раньше (§ 112), когда говорили о графике функции: $y=\frac{6}{x}$, выражающей обратную пропорциональную зависимость. Там мы видели (черт. 25), что когда абсцисса x уменьшается, приближаясь к нулю (напр., переходя через значения: ${}^1/_2$, ${}^1/_4$, ${}^1/_8$, ${}^1/_{16}$ и т. д.), то ордината y, равная дроби $\frac{6}{x}$, увеличивается неограниченно, так что кривая (гипербола), по мере приближения ее к оси y-ов, подымается вверх беспредельно.

Если теперь допустим, что числитель a, или знаменатель b, или тот и другой — числа отрицательные, то сказанное сейчас может быть повторено и о такой дроби, но только надо тогда говорить не о величине самой дроби, а об абсолютной величине ее.

Таким образом, *если в дроби знаменатель неограниченно приближается к нулю, а числитель остается без изменения, то абсолютная величина дроби неограниченно увеличивается.*

Иногда для краткости речи условно говорят, что при $a=0$ уравнение $ax=b$ имеет бесконечное решение (бесконечный корень). Фразу эту нельзя понимать буквально, так как уравнение в этом случае совсем не имеет корня; фраза эта есть только краткое выражение следующего предложения: если в уравнении $ax=b$ коэффициент a неограниченно приближается к нулю, а число b остается неизменным, то уравнение получает такое решение (положительное или отрицательное), которого абсолютная величина неограниченно возрастает.

В том же смысле употребляется иногда краткая запись, вроде следующей:

$$\frac{m}{0}=\pm\infty$$

(читается: m, деленное на нуль, равно плюс-минус бесконечности). Запись эта означает только то свойство дроби, что если знаменатель ее стремится к нулю, а числитель остается без изменения, то абсолютная величина дроби неограниченно увеличивается (или, как иногда говорят: стремится к бесконечности), причем сама дробь остается или положительной, или отрицательной (смотря по тому, имеет ли знаменатель, стремящийся к нулю, одинаковый знак с числителем или противоположный).

Подобным же образом мы можем убедиться еще в следующем свойстве: *если абсолютная величина знаменателя дроби неограниченно увеличивается, а числитель остается неизменным, то величина дроби неограниченно приближается к нулю.* Свойство это сокращенно выражают таким условным равенством (которое тоже нельзя понимать буквально):

$$\frac{m}{\pm\infty}=0.$$

Это свойство дроби мы также видели на графике функции [illegible] $=\frac{6}{x}$ (черт. 25); если абсцисса x этого графика возрастает спредельно, то дробь $\frac{6}{x}$ уменьшается, неограниченно прибли- ясь к нулю, так что гипербола, по мере продолжения ее направо, все ближе и ближе придвигается к оси x-ов (никогда ее не достигая).

131. Неопределенное решение. Если в уравнении $ax=b$ оба числа a и b окажутся нулями, то уравнение обращается в тождество: $0 \cdot x=0$, верное при всяком значении x. Значит, в этом случае уравнение становится неопределенным, т. е. оно допускает бесчисленное множество произвольных решений.

Если бы мы, не заметив, что $a=0$, разделили обе части уравнения на a, то для x получили бы дробь $\frac{b}{a}$, которая при $b=0$ и при $a=0$ обращается в частное $\frac{0}{0}$. Такое частное, по определению деления, может равняться любому числу (§ 33); значит, и в этом случае мы убедились бы, что уравнение допускает бесчисленное множество решений.

Задача. Какое число надо приложить к числителю и знаменателю дроби $\frac{a}{b}$, чтобы эта дробь сделалась равной числу m?

Обозначив искомое число буквой x, получим такое уравнение:

$$\frac{a+x}{b+x}=m,$$

откуда

$$a+x=bm+mx; \quad x-mx=bm-a;$$

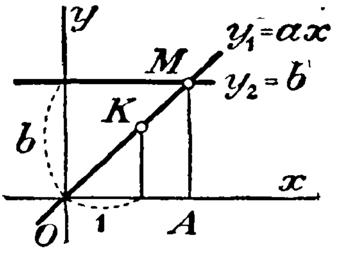
$$(1-m)x=bm-a; \quad x=\frac{bm-a}{1-m}.$$

Допустим, что числа a, b и m заданы такими, что числитель и знаменатель дроби, выведенной нами для x, обратятся в нули, т. е., что $bm=a$ и $1=m$. Тогда для x получается выражение $\frac{0}{0}$ и, следовательно, уравнение и задача становятся неопределенными. И действительно, в этом случае $a=b$ и дробь равна 1, какое бы число x мы ни прибавили к числителю и знаменателю.

132. Графическое истолкование решения уравнения $ax=b$. Из двух способов графического решения уравнения, указанных нами раньше (§ 119), возьмем второй. Обозначим левую часть уравнения буквою y_1 и правую часть буквою y_2 и построим на одном и том же чертеже графики двух функций:

$$y_1=ax \text{ и } y_2=b.$$

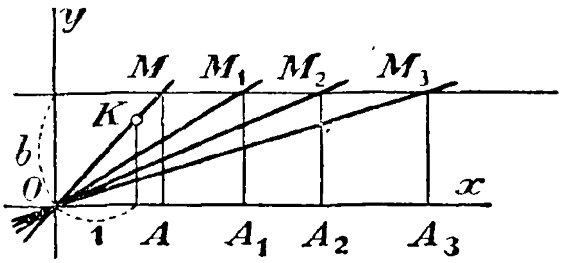
График первой функции есть прямая, проходящая через начало координат и через точку K (1, a), график второй функ ции есть прямая, параллельная оси x-ов и отсекающая от оси y-ов отрезок b (на нашем чертеже мы изобразили случай, когда $a > 0$ и $b > 0$; предоставляем самим читателям сделать чертежи для случаев, когда: 1) $a > 0$, но $b < 0$; 2) $a < 0$, но $b > 0$ и 3) $a < 0$ и $b < 0$). Пересечение этих двух прямых определит некоторую точку M, абсцисса которой OA и будет корень уравнения $ax = b$, так как при этой абсциссе ордината прямой $y_1 = ax$ равна ординате прямой $y_2 = b$, и, следовательно, $ax = b$.



Черт. 35.

Пользуясь таким графическим изображением, мы можем наглядно истолковать все случаи решения уравнения $ax = b$. Ограничимся рассмотрением двух случаев: 1) „бесконечного“ решения и 2) неопределенного решения.

а) Бесконечное решение. Уменьшая численную величину коэффициента a, мы заставляем прямую $y = ax$ все более и более приближаться к оси x-ов. Тогда точка M, в которой прямая $y = b$ пересекается с прямой $y = ax$, все более и более удаляется направо, переходя через положения M_1, M_2, M_3 и т. д., причем абсцисса OA точки пересечения беспредельно увеличивается, переходя через значения OA_1, OA_2, OA_3 и т. д. Значит, когда a неограниченно уменьшается, приближаясь к нулю, корень уравнения $ax = b$ беспредельно возрастает. Таким образом:



Черт. 36.

$$x = \frac{b}{0} = \infty.$$

(На чертеже мы брали случай, когда $a > 0$ и $b > 0$; в других случаях мы могли бы получить: $x = \frac{b}{0} = -\infty$).

б) Неопределенное решение получается, как мы видели (§ 131), при $a = b = 0$. Чтобы истолковать этот случай графически, вообразим, что на нашем чертеже величина b уменьшается, приближаясь к нулю; тогда прямая $y_2=b$, оставаясь параллельною оси x-ов, будет все более и более приближаться к этой оси и при $b=0$ сольется с нею. С другой стороны, прямая $y_1=ax$ при $a=0$ обратится тоже в ось x-ов, и тогда две прямые $y_2=b$ и $y_1=ax$ совпадут с осью x-ов, и, следовательно, каждую точку этой оси можно считать за точку пересечения; значит, величина корня остается неопределенной.

133. Буквенные уравнения. Нет надобности, чтобы неизвестное всегда обозначалось буквою x; оно может быть обозначено и какою угодно другою буквою. Возьмем, напр., формулу:

$$s=\frac{1}{2}bh,$$

выражающую площадь s треугольника, у которого основание равно b линейных единиц и высота равна h таких же единиц. Формула эта представляет собой уравнение, в котором каждое из чисел s, b и h может быть принято за неизвестное. Пусть, напр., предложена такая задача: найти основание треугольника, у которого высота равна h каких-нибудь линейных единиц, а площадь составляет s соответствующих квадратных единиц. Тогда в нашей формуле число b должно считаться неизвестным, а числа s и h известными. Конечно, мы можем неизвестное основание обозначить буквою x и написать уравнение так:

$$s=\frac{1}{2}hx,$$

откуда

$$x=s:\frac{1}{2}h=2s:h=\frac{2s}{h}.$$

Но можно, не заменяя b на x, прямо из уравнения: $s={}^1/_2bh$ определить b в зависимости от s и h:

$$s=\frac{1}{2}bh;\quad 2s=bh;\quad b=\frac{2s}{h}.$$

Вообще надо привыкнуть решать не только численные уравнения, в которых данные числа выражены цифрами, а неизвестное обозначено буквой x, но и буквенные уравнения в которых данные числа и неизвестное обозначены какими угодно буквами. Возьмем для примера еще формулу, известную из физики (см. задачу § 113):

$$l_t=l_0+l_0at,$$

в которой l_0 означает длину какого-нибудь стержня при 0°, l_t означает длину этого стержня при температуре t и a — так называемый **коэффициент расширения** вещества, из которого сделан стержень, т. е. число, показывающее, на какую долю длины при 0° увеличивается длина стержня при нагревании на каждый градус. В эту формулу входят 4 величины: l_0, l_t, a и t; каждую из них можно принять за неизвестное, которое можно определить из формулы в зависимости от остальных трех величин. Так, из формулы находим.

$$l_0 at = l_t - l_0;\quad a = \frac{l_t - l_0}{l_0 t};\quad t = \frac{l_t - l_0}{l_0 a};$$

$$l_t = l_0(1 + at);\quad l_0 = \frac{l_t}{1 + at}.$$

Глава третья.

Неравенства первой степени.

134. Определение понятий „больше“ и „меньше“. Когда мы говорим, что 10 больше 7, а 7 меньше 10, то мы разумеем при этом, что число 10 включает в себе как часть число 7, и что, следовательно, от 10 можно отделить (вычесть) 7, тогда как от 7 нельзя отделить 10; другими словами, мы хотим сказать, что разность 10—7 есть некоторое положительное число, тогда как разность 7—10 есть отрицательное число.

Условимся распространить такое понимание о большем и меньшем и на числа относительные, а именно условимся, что *относительное число* **a** *считается бо́льшим другого относительного числа* **b** *в том случае, когда разность* **a**—**b** *число положительное, и* **a** *считается меньшим* **b**, *когда разность* **a**—**b** *число отрицательное.*

При таком соглашении мы должны считать, что:

а) *Всякое положительное число больше всякого отрицательного*; напр., $+3 > -5$, потому что разность $(+3) - (-5)$, равная сумме $3 + 5$, есть число положительное.

б) *Всякое положительное число больше нуля* по той же причине; напр., $+2 > 0$, так как разность $(+2) - 0 = +2$.

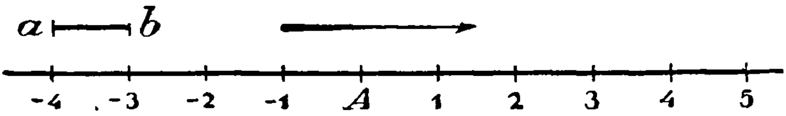
в) *Всякое отрицательное число меньше нуля,* так как разность между отрицательным числом и нулем всегда отрицательна; напр., $-3 < 0$, так как $(-3) - 0 = -3$.

г) *Из двух отрицательных чисел то больше, у которого абсолютная величина меньше*: напр., $-7 > -9$, так как разность

$(-7)-(-9)=(-7)+9=+2$, т. е. она есть положительное число.

Замечания. 1. Если желают кратко выразить, что число a положительное, то пишут: $a>0$; если же желают показать, что число a отрицательное, то пишут: $a<0$.

2. Для ясного представления сравнительной величины относительных чисел всего лучше обратиться к наглядному изображению их на числовой прямой (§ 15). Выбрав произвольную единицу длины (ab, черт. 37), вообразим, что на неограниченной прямой вправо от какой-нибудь ее точки A, принятой за начало, отложены отрезки, изображающие положительные числа $+1$, $+2$, $+3$... (и промежуточные), а влево от той же точки отложены отрезки, изображающие отрицательные числа -1, -2, -3... (и промежуточные). Тогда, двигаясь по этой прямой слева направо (по направлению стрелки), мы будем постоянно переходить от чисел меньших к бо́льшим, а двигаясь в обратном направлении, будем постоянно переходить от чисел бо́льших к меньшим.



Черт. 37.

135. Свойства неравенств. Два числа или два алгебраических выражения, соединенные между собою знаками $>$ или $<$, составляют неравенство. Как и равенство, неравенство состоит из двух частей: левой и правой. Так, если возьмем неравенство:

$$3+8>10-2,$$

то левая часть его будет $3+8$, а правая $10-2$.

Обозначим левую часть неравенства одною буквою a, а правую часть другою буквою b. Тогда мы можем свойства неравенств высказать так:

а) Если $a>b$, то $b<a$. Действительно, если $a>b$, то это значит, что разность $a-b$ положительное число; но тогда разность $b-a$ есть число отрицательное, и потому $b<a$.

б) Если $a>b$ и $b>c$, то $a>c$. Действительно, если $a>b$ и $b>c$, то это значит, что обе разности: $a-b$ и $b-c$ положительные числа; но тогда и сумма этих разностей положительное число, а эта сумма равна:

$$(a-b)+(b-c)=a-b+b-c=a-c.$$

Если же $a-c>0$, то это значит, что $a>c$.

в) Если $a>b$ и m какое-нибудь относительное число, то $a+m>b+m$. Действительно, если $a>b$, то это значит, что разность $a-b$ положительное число; но тогда и разность $(a+m)-(b+m)$ есть также положительное число, так как эта разность равна

$$(a+m)-(b+m)=a+m-b-m=a-b.$$

Примеры.

$$+\begin{cases}-8>-10\\+3\quad+3\end{cases}\qquad\qquad +\begin{cases}-8>-10\\-3\quad-3\end{cases}$$

$$\begin{array}{c}\hline -5>-7\end{array}\qquad\qquad\begin{array}{c}\hline -11>-13\end{array}$$

Так как вычитание какого-нибудь числа равносильно прибавлению того же числа, но с противоположным знаком, то если $a>b$, то и $a-m>b-m$. Таким образом, *если к обеим частям неравенства прибавим (или вычтем) одно и то же число, то знак неравенства не изменится* (т. е. бо́льшее останется бо́льшим).

г) Если $a>b$ и m *положительное* число, то $am>bm$. Действительно, если разность $a-b$ положительное число, то и разность $am-bm$ положительное число, так как эта разность равна $(a-b)m$, а произведение положительного числа на положительное есть положительное число.

Примеры.

$$\begin{array}{rr} -9>&-12\\ 3&3\\ \hline -27>&-36\end{array}\qquad\qquad\begin{array}{rr} -9>&-12\\ {}^1/_3&{}^1/_3\\ \hline -3>&-4\end{array}$$

Так как деление на какое-нибудь число равносильно умножению на обратное число, то если $a>b$ и m положительное число, то и $a\cdot\frac{1}{m}>b\cdot\frac{1}{m}$, т. е. $a:m>b:m$.

Таким образом, *если обе части неравенства умножим (или разделим) на одно и то же* ***положительное*** *число, то знак неравенства не изменится.*

д) Если $a>b$ и m число *отрицательное*, то $am<bm$. Действительно, если разность $a-b$ положительное число, то раз-

ность $am - bm$ будет отрицательное число, так как эта разность равна произведению положительного числа $a - b$ на отрицательное число m.

Примеры.

$$\begin{array}{r} -9 > -12 \\ -3 \quad -3 \\ \hline +27 < +36 \end{array} \qquad \begin{array}{r} -9 > -12 \\ -\tfrac{1}{3} \quad -\tfrac{1}{3} \\ \hline +3 < +4. \end{array}$$

Таким образом, *если обе части неравенства умножим (или разделим) на одно и то же* ***отрицательное число,*** *то знак неравенства изменится на противоположный.*

136. Решение неравенства 1-й степени с одним неизвестным. Задача. Найти число, четверть которого, увеличенная на 10, превосходит $^2/_3$ числа, уменьшенного на 5.

Обозначив искомое число буквою x, мы получим неравенство:

$$\frac{1}{4}x + 10 > \frac{2}{3}x - 5.$$

Неравенство это уподобляется уравнению 1-й степени с одним неизвестным. Решить неравенство, содержащее неизвестное, значит найти такое число или такие числа, которые, будучи подставлены в неравенства на место неизвестного, обращают его в очевидное тождественное неравенство. Решение неравенства первой степени выполняется так же, как и решение уравнения, так как две основные истины, на которых основано решение уравнений (§§ 121, 122), применимы и к неравенствам, с единственным исключением, что при умножении (или делении) обеих частей неравенства на одно и то же отрицательное число знак неравенства должен быть изменен на противоположный.

Чтобы решить наше неравенство, освободим его сначала от знаменателей. Так как общий знаменатель 12, то умножим обе части неравенства на 12, от чего знак неравенства не изменится:

$$3x + 120 > 8x - 60.$$

Теперь перенесем неизвестные в одну часть неравенства, а известные в другую (отняв от обеих частей неравенства по 120 и по $8x$):

$$3x - 8x > -60 - 120, \text{ т. е. } -5x > -180.$$

Теперь разделим обе части на -5, отчего знак неравенства изменится на противоположный:

$$x < \frac{-180}{-5}, \text{ т. е. } x < 36.$$

(Можно было бы также сказать: обе части неравенства $-5x > -180$ умножим на -1, отчего знак неравенства изменится на противоположный: $5x < 180$, и теперь разделим на 5.)

Замечание. Более подробные сведения о неравенствах см. во 2-й части, § 404 и след.

ОТДЕЛ ПЯТЫЙ.

СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ПЕРВОЙ СТЕПЕНИ.

Глава первая.

Система двух уравнений с двумя неизвестными.

137. Задача. Из опыта найдено, что слиток из серебра и меди весом в 148 *кг* теряет в воде весу $14\,{}^2/_3$ *кг*. Определить, сколько в нем серебра и сколько меди, если известно, что в воде 21 *кг* серебра теряют 2 *кг*, а 9 *кг* меди теряют 1 *кг*.

Положим, что в данном слитке содержится серебра x *кг*, а меди y *кг*. Тогда одно уравнение будет: $x+y=148$. Для составления другого уравнения примем во внимание, что если 21 *кг* серебра теряют в воде 2 *кг* весу, то это значит, что 1 *кг* серебра теряет в воде ${}^2/_{21}$ *кг*. Тогда x *кг* должны терять в воде ${}^2/_{21}\,x$ *кг* весу. Подобно этому, если 9 *кг* меди теряют в воде 1 *кг*, то это значит, что 1 *кг* меди теряет ${}^1/_9$ *кг*; следовательно, y *кг* меди теряют ${}^1/_9\,y$ *кг*. Поэтому второе уравнение будет: ${}^2/_{21}\,x+{}^1/_9\,y=14\,{}^2/_3$. Мы получили таким образом два уравнения с 2 неизвестными:

$$x+y=148 \text{ и } {}^2/_{21}x+{}^1/_9y=14\,{}^2/_3={}^{44}/_3.$$

Второе уравнение можно упростить, освободив его от дробей. Для этого приведем все дроби к одному знаменателю:

$${}^6/_{63}\,x+{}^7/_{63}\,y={}^{924}/_{63}.$$

Теперь умножим обе части уравнения на 63; получим равносильное уравнение:

$$6x+7y=924$$

Мы имеем теперь два уравнения:

$$x+y=148 \text{ и } 6x+7y=924.$$

Мы можем решить эти два уравнения несколькими способами. Напр. так: из первого уравнения определим x в зависимости от y (другими словами, определим x как функцию от y):

$$x=148-y.$$

Так как во втором уравнении буквы x и y означают те же числа, что и в первом уравнении, то мы можем во второе уравнение подставить вместо x разность $148-y$:

$$6(148-y)+7y=924.$$

Решим это уравнение с одним неизвестным:

$$888-6y+7y=924; \quad y=924-888=36.$$

Тогда $$x=148-36=112.$$

Таким образом, в данном слитке содержится 112 *кг* серебра и 36 *кг* меди.

138. Нормальный вид уравнения первой степени с двумя неизвестными. Возьмем такой пример уравнения с 2 неизвестными:

$$2(2x+3y-5)={}^5/_8(x+3)+{}^3/_4(y-4).$$

С целью упростить это уравнение, сделаем в нем тот же ряд преобразований, какой был указан раньше для уравнения с 1 неизвестным, а именно.

1) Раскроем скобки: $4x+6y-10={}^5/_8x+{}^{15}/_8+{}^3/_4y-3$.

2) Освободимся от знаменателей, умножив все члены на 8:

$$32x+48y-80=5x+15+6y-24.$$

3) Перенесем неизвестные члены в одну часть уравнения, а известные в другую:

$$32x+48y-5x-6y=15-24+80.$$

4) Сделаем приведение подобных членов:

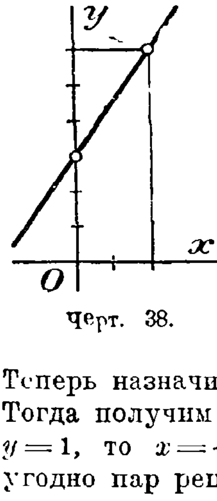
$$27x+42y=71.$$

Таким образом, данное уравнение после указанных преобразований оказывается такого вида, при котором в левой части уравнения находятся только два члена: один с неизвестным x (в первой степени) и другой с неизвестным y (в первой степени), правая же часть уравнения состоит только из одного члена, не содержащего неизвестных. Коэффициенты при x и y могут быть или оба положительные (как во взятом нами примере), или оба отрицательные (этот случай, впрочем, можно свести на предыдущий, умножив все члены уравнения на -1), или один положительный, а другой отрицательный; член, стоящий в правой части, может быть или положительным числом (как в настоящем примере), или отрицательным и даже нулем. Обозначив коэффициенты при x и y буквами a и b и член, не содержащий неизвестных, буквою c, мы можем уравнение с 2 неизвестными 1-й степени в общем виде представить так:

$$ax+by=c$$

Такой вид уравнения называется **нормальным** видом уравнения 1-й степени с 2 неизвестными.

139. Неопределенность одного уравнения с 2 неизвестными.



Черт. 38.

Одно уравнение с 2 неизвестными имеет бесчисленное множество корней. Действительно, если для одного какого-нибудь неизвестного мы назначим произвольное число и это число подставим в уравнение, то тогда мы получим уравнение только с одним другим неизвестным; из этого уравнения можно найти это другое неизвестное. Так, если в уравнении $3x-2y=-6$ мы примем, что $y=2$, то уравнение будет $3x-4=-6$, откуда найдем: $3x=-2$ и $x=-{}^2/_3$. Значит, если $y=2$, то $x=-{}^2/_3$. Теперь назначим для y какое-нибудь другое число, напр., $y=1$. Тогда получим $3x-2=-6$, $3x=-4$, $x=-1{}^1/_3$. Значит, если $y=1$, то $x=-1{}^1/_3$. Таким образом, мы можем найти сколько угодно пар решений, и, следовательно, уравнение окажется неопределенным.

Это же можно показать и графически. Из уравнения:

$$3x-2y=-6 \qquad (1$$

определим y как функцию от x [1]:

$$y=\frac{3x+6}{2}=1{}^1/_2\,x+3. \qquad (2)$$

---

[1] Надо привыкнуть быстро и безошибочно из данного уравнения определять одно неизвестное как функцию другого неизвестного. Так, чтобы из нашего уравнения определить y как функцию от x, надо мысленно перенести член $-2y$ направо, а член -6 налево, затем части уравнения переставить и разделить их на 2; писать надо прямо результат этих преобразований.

Функция эта есть двучлен 1-й степени, а такой двучлен изображается в координатных осях в виде прямой линии, которую мы можем построить (черт. 38) по двум точкам (§ 118), напр. таким:

$$\begin{cases} x=0 \\ y=3 \end{cases} \qquad \begin{cases} x=2 \\ y=6 \end{cases}$$

Координаты каждой точки этой прямой удовлетворяют уравнению (2) и, следовательно, удовлетворяют и уравнению (1); а так как на прямой бесчисленное множество точек, то уравнение (1) имеет бесчисленное множество решений.

140. Система уравнений. Принято говорить, что несколько уравнений образуют систему, если во всех этих уравнениях каждая из букв x, y, .. означает одно и то же число для всех уравнений.

Если, напр., два уравнения:

$$\begin{cases} 2x-5=3y-2 \\ 8x-y=2y+21 \end{cases}$$

рассматриваются при том условии, что буква x означает одно и то же число в обоих уравнениях, равным образом и буква y, то такие уравнения образуют систему. Это бывает всякий раз в том случае, когда уравнения составлены из условий одной и той же задачи.

Укажем три способа решения системы 2 уравнений 1-й степени с 2 неизвестными.

141. Способ подстановки. Этот способ мы уже применяли раньше, когда решали задачу о слитке из серебра и меди (§ 137). Возьмем теперь более сложный пример:

$$8x-5y=-16; \quad 10x+3y=17$$

(оба уравнения мы привели к нормальному виду).

Из одного уравнения, напр. из первого, определим одно какое-нибудь неизвестное, напр. x, как функцию другого неизвестного:

$$x=\frac{5y-16}{8}.$$

Так как второе уравнение должно удовлетворяться теми же значениями, как и первое, то мы можем подставить в него вместо x найденное выражение, от чего получим уравнение с одним неизвестным y:

$$10\cdot\frac{5y-16}{8}+3y=17.$$

Решим это уравнение:

$$\frac{5(5y-16)}{4}+3y=17;\quad 25y-80+12y=68;\quad 37y=148;\quad y=4;$$

тогда:

$$x=\frac{5y-16}{8}=\frac{5\cdot4-16}{8}=\frac{4}{8}=\frac{1}{2}.$$

Мы могли бы определить из одного уравнения y как функцию от x и полученное выражение подставить на место y в другое уравнение; тогда мы получили бы уравнение с неизвестным x.

Способ этот особенно удобен тогда, когда коэффициент при каком-нибудь неизвестном равен 1; тогда всего лучше определить это неизвестное как функцию другого неизвестного (не придется делить на коэффициент), и т. д.

Напр.:

$$\begin{cases}3x-2y=11\\4x+\ \ y=22.\end{cases}$$

Из второго уравнения находим:

$$y=22-4x.$$

Тогда первое уравнение дает:

$$3x-2\ (22-4x)=11;\ 3x-44+8x=11;\ 11x=44+11=5$$[illegible]

$$x=\frac{55}{11}=5;\ y=22-4\cdot5=2.$$

Правило. *Чтобы решить систему двух уравнений с 2 неизвестными способом подстановки, надо определить из какого-нибудь уравнения одно неизвестное как функцию другого неизвестного и полученное выражение подставить в другое уравнение; от этого получается уравнение с одним неизвестным. Решив его, находят это неизвестное. Подставив найденное число в выражение, выведенное раньше для первого неизвестного, находят и это другое неизвестное.*

142. Способ сложения или вычитания. Предположим сначала, что в данной системе уравнений (приведенных предварительно к нормальному виду) коэффициенты при каком-нибудь неизвестном, напр. при y, будут одинаковы. При этом могут представиться два случая: 1) знаки перед такими коэффициентами разные и 2) знаки одинаковые. Рассмотрим эти два случая параллельно. Пусть, напр., даны две системы:

$$\begin{array}{c|c} \text{1 система:} & \text{2 система:} \\ \begin{cases}7x-2y=27\\ 5x+2y=33\end{cases} & \begin{cases}5x+8y=31\\ 3x+8y=25.\end{cases}\end{array}$$

Если сложим почленно уравнения первой системы и вычтем почленно уравнения второй системы, то неизвестное y исключится:

$$\begin{array}{l|l} \begin{cases}7x-2y=27\\ 5x+2y=33\end{cases} & \begin{cases}5x+8y=31\\ -3x\pm 8y=-25\end{cases}\\ \hline 12x\qquad=60 & 2x\qquad=6 \end{array}$$

Откуда: $\quad x=5 \quad\Big|\quad x=3.$

Подставив в одно из данных уравнений вместо x найденное для него число, найдем y:

$$\begin{array}{c|c} 7\cdot5-2y=27 & 5\cdot3+8y=31\\ y=4 & y=2\end{array}$$

Возьмем теперь систему, в которой коэффициенты различны, напр. такую:

$$\begin{cases}7x+6y=29\\ -5x+8y=10.\end{cases}$$

Мы можем тогда предварительно уравнять коэффициенты при каком-нибудь одном неизвестном, напр. при x. Для этого найдем кратное (лучше всего наименьшее) коэффициентов 7 и 5 (это будет 35) и умножим обе части каждого уравнения на соответствующий дополнительный множитель (как это делается при приведении дробей к общему знаменателю):

$$\begin{array}{l|l} \begin{cases}7x+6y=29\ (\text{на }5)\\ -5x+8y=10\ (\text{на }7)\end{cases} & \begin{cases}35x+30y=145\\ -35x+56y=70.\end{cases}\end{array}$$

После этого остается только сложить или вычесть преобразованные уравнения. В нашем примере знаки перед коэффициентами x разные; поэтому уравнения надо сложить:

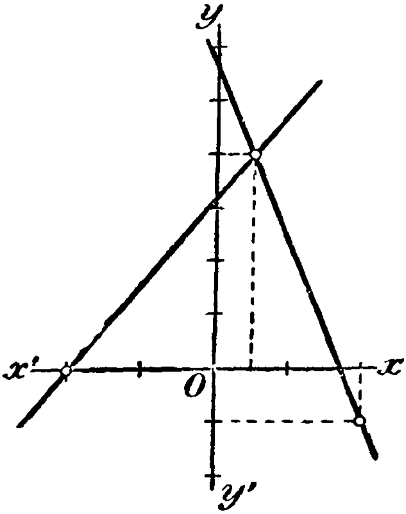
$$\begin{array}{r} 35x+30y=145 \\ -35x+56y=\ \ 70 \\ \hline \end{array}$$

$$86y=215;\ y=\frac{215}{86}=2^1/_2.$$

Теперь первое уравнение дает:

$$7x+6\cdot 2^1/_2=29;\ 7x+15=29;\ 7x=14;\ x=2.$$

Правило. *Чтобы решить систему двух уравнений с 2 неизвестными способом сложения или вычитания, надо сначала уравнять в обоих уравнениях коэффициенты при каком-нибудь одном неизвестном, а потом сложить оба уравнения, если знаки перед этими коэффициентами разные, или вычесть уравнения, если знаки одинаковые.*



Черт. 39.

143. Графическое решение. Пусть дана система:

$$8x-5y=-16;\ 10x+3y=17.$$

Из каждого уравнения определим y как функцию от x:

1) $y=\frac{8x+16}{5}=1^3/_5x+3^1/_5;$

2) $y=\frac{17-10x}{3}=5^2/_3-3^1/_3x.$

Графики этих функций должны быть прямые линии. Построим на одном чертеже (черт. 39) каждую из них по двум точкам, напр. по таким:

из уравнения . . . . $y=1^3/_5x+3^1/_5$:

$$\begin{cases} x=0 \\ y=3^1/_5 \end{cases} \qquad \begin{cases} x=-2 \\ y=\ \ 0 \end{cases}$$

из уравнения . . . . $y=5^2/_3-3^1/_3x$:

$$\begin{cases} x=0 \\ y=5^2/_3 \end{cases} \qquad \begin{cases} x=\ \ 2 \\ y=-1. \end{cases}$$

На чертеже видно, что две прямые пересекаются в точке, абсцисса которой равна $^1/_2$, а ордината 4. Эти значения x и y, удовлетворяя обоим уравнениям, и будут решениями данной системы.

Замечания. 1) Если бы случилось, что прямые, выражающие данные уравнения, оказались параллельными и, следовательно, не существовало бы точки их пересечения, то это значило бы, что уравнения не имеют корней.

2) Может иногда случиться, что 2 прямые сливаются в одну; тогда координаты всякой точки этой прямой удовлетворяют данным уравнениям, и, значит, система неопределенна.

3) В конце 2-й части этой книги указаны общие формулы для решения системы двух уравнений с 2 неизвестными первой степени (§ 396 и след.).

Глава вторая.

Система трех уравнений с тремя неизвестными.

144. Нормальный вид уравнения первой степени с тремя неизвестными. Если в уравнении 1-й степени с 3 неизвестными x, y и z сделаны те же преобразования, какие были нами раньше указаны для уравнения с 1 и 2 неизвестными, то мы приведем уравнение к такому виду (называемому нормальным), при котором в левой части уравнения находятся только три члена: один с x, другой с y и третий с z, а в правой части будет один член, не содержащий неизвестных.

Таково, напр., уравнение:

$$5x - 3y - 4z = -12.$$

Общий вид его есть следующий:

$$ax + by + cz = d,$$

где a, b, c и d какие-нибудь относительные числа.

145. Неопределенность двух и одного уравнения с тремя неизвестными. Положим, нам дана система 2 уравнений с 3 неизвестными:

$$5x - 3y + z = 2; \qquad 2x + y - z = 6.$$

Назначим одному неизвестному, напр. z, какое-нибудь произвольное число, положим 1, и подставим это число на место z:

$$\begin{cases} 5x - 3y + 1 = 2 \\ 2x + y - 1 = 6 \end{cases} \quad \text{т. е.} \quad \begin{cases} 5x - 3y = 1 \\ 2x + y = 7. \end{cases}$$

Мы получили таким образом систему 2 уравнений с 2 неизвестными. Решив ее каким-нибудь способом, найдем: $x=2$, $y=3$; значит, данная система с 3 неизвестными удовлетворяется при $x=2$, $y=3$ и $z=1$. Дадим теперь неизвестному z какое-нибудь иное значение, напр. $z=0$, и подставим это значение в данные уравнения:

$$5x-3y=2; \qquad 2x+y=6.$$

Мы снова получим систему 2 уравнений с 2 неизвестными. Решив ее каким-нибудь способом, найдем:

$$x=\frac{20}{11}=1\frac{9}{11}, \quad y=2\frac{4}{11}.$$

Значит, данная система удовлетворяется при $x=1^9/_{11}$, $y=2^4/_{11}$ и $z=0$. Назначив для z еще какое-нибудь (третье) значение, мы снова получим систему 2 уравнений с 2 неизвестными, из которой найдем новые значения для x и y. Так как для z мы можем назначать сколько угодно различных чисел, то и для x и y можем получить сколько угодно значений (соответствующих взятым значениям z). Значит, 2 уравнения с 3 неизвестными допускают бесчисленное множество решений; другими словами, такая система неопределенна.

Еще бо́льшая неопределенность будет, если имеется всего 1 уравнение с 3 неизвестными. Тогда можно будет для каких-нибудь 2 неизвестных назначить произвольные числа; третье же неизвестное найдется из данного уравнения, если подставить в него значения, взятые произвольно для двух неизвестных.

146. Система 3 уравнений с 3 неизвестными. Для того, чтобы можно было найти определенные численные значения для трех неизвестных x, y и z, необходимо, чтобы была задана система 3 уравнений. Такая система может быть решена способом подстановки, а также и способом сложения или вычитания уравнений. Покажем применение этих способов на следующем примере (каждое уравнение предварительно приведено к нормальному виду):

$$\begin{cases} 3x-2y+5z=7 \\ 7x+4y-8z=3 \\ 5x-3y-4z=-12 \end{cases}$$

147. Способ подстановки. Из какого-нибудь уравнения, напр. из первого, определим одно неизвестное, напр. x, как функцию от двух остальных неизвестных:

$$x = \frac{7 + 2y - 5z}{3}.$$

Так как во всех уравнениях x означает одно и то же число, то мы можем подставить найденное выражение на место x в остальные уравнения:

$$7 \cdot \frac{7 + 2y - 5z}{3} + 4y - 8z = 3.$$

$$5 \cdot \frac{7 + 2y - 5z}{3} - 3y - 4z = -12.$$

Мы приходим таким образом к системе 2 уравнений с 2 неизвестными y и z. Решив эту систему по какому-нибудь из способов, указанных раньше, найдем численные значения для y и z. В нашем примере это будут значения: $y = 3$, $z = 2$; подставив эти числа в выражение, выведенное нами для x, найдем и это неизвестное:

$$x = \frac{7 + 2 \cdot 3 - 5 \cdot 2}{3} = 1.$$

Таким образом, предложенная система имеет решение $x = 1$, $y = 3$, $z = 2$ (в чем можно убедиться поверкою).

148. Способ сложения или вычитания. Из 3 данных уравнений возьмем какие-нибудь два, напр. 1-е и 2-е, и, уравняв в них коэффициенты перед одним неизвестным, напр. перед z, исключим из них это неизвестное способом сложения или вычитания; от этого получим одно уравнение с 2 неизвестными x и y. Потом возьмем какие-нибудь два других уравнения из 3 данных, напр. 1-е и 3-е (или 2-е и 3-е), и тем же способом исключим из них то же неизвестное, т. е. z; от этого получим еще одно уравнение с x и y:

$$\begin{array}{r|l} 1)\ 3x - 2y + 5z = 7\ (\text{на } 8) & 24x - 16y + 40z = 56 \\ 2)\ 7x + 4y - 8z = 3\ (\text{на } 5) & 35x + 20y - 40z = 15 \\ \cline{2-2} & 59x + 4y = 71 \end{array}$$

$$\begin{array}{r|l} 1)\ 3x - 2y + 5z = 7\ (\text{на } 4) & 12x - 8y + 20z = 28 \\ 3)\ 5x - 3y - 4z = -12\ (\text{на } 5) & 25x - 15y - 20z = -60 \\ \cline{2-2} & 37x - 23y = -32. \end{array}$$

Решим получившиеся два уравнения: $x=1$, $y=3$. Вставим эти числа в одно из трех данных уравнений, напр. в первое:

$$3\cdot 1-2\cdot 3+5z=7;\quad 5z=7-3+6=10;\quad z=2.$$

Замечание. Теми же двумя способами мы можем привести систему 4 уравнений с 4 неизвестными к системе 3 уравнений с 3 неизвестными (а эту систему — к системе 2 уравнений с 2 неизвестными и т. д.). Вообще систему m уравнений с m неизвестными мы можем привести к системе $m-1$ уравнений с $m-1$ неизвестными (а эту систему к системе $m-2$ уравнений с $m-2$ неизвестными и т. д.).

Глава третья.

Некоторые особые случаи систем уравнений.

149. Случай, когда не все неизвестные входят в каждое из данных уравнений; напр.:

$$\left\{\begin{array}{r} 10x-y+3z=5\\ 4v-5x=6\\ 2y+3z=6\\ 3y+2v=4. \end{array}\right.$$

В этом случае система решается быстрее, чем обыкновенно, так как в некоторых уравнениях уже исключены те или другие неизвестные. Надо только сообразить, какие неизвестные и из каких уравнений следует исключить, чтобы возможно скорее дойти до одного уравнения с одним неизвестным. В нашем примере, исключив z из 1-го и 3-го уравнений и v из 2-го и 4-го, получим 2 уравнения с x и y:

$$-\left\{\begin{array}{r} 10x-y+3z=5\\ 2y+3z=6 \end{array}\right. \qquad -\left\{\begin{array}{r} 4v-5x=6\\ 4v+6y=8 \end{array}\right.$$
$$\overline{\;10x-3y\quad=-1\;} \qquad \overline{\;-5x-6y=-2.\;}$$

Решив эти уравнения, найдем: $x=0$, $y=\frac{1}{3}$.

Теперь вставим эти числа во 2-е и 3-е уравнения; тогда получим:

$$v=\frac{3}{2},\quad z=\frac{16}{9}=1\frac{7}{9}.$$

150. Случай, когда неизвестные входят в виде дробей: $\frac{1}{x}$, $\frac{1}{y}$... Пусть дана, напр., система:

$$\begin{cases} \frac{1}{x}+\frac{1}{y}-\frac{1}{z}=\frac{7}{6} \\ \frac{1}{x}-\frac{1}{y}-\frac{1}{z}=-\frac{5}{6} \\ \frac{1}{y}-\frac{1}{x}-\frac{1}{z}=\frac{1}{6}. \end{cases}$$

Всего проще такую систему можно решить посредством ведения **вспомогательных неизвестных**. Положим, что $\frac{1}{x}=x'$, $\frac{1}{y}=y'$ и $\frac{1}{z}=z'$. Тогда мы получим такую систему неизвестными x', y' и z':

$$\begin{cases} x'+y'-z'={}^7/_6 \\ x'-y'-z'=-{}^5/_6 \\ y'-x'-z'={}^1/_6. \end{cases}$$

$\frac{7}{6}-y+z$

7

Решив эту систему, найдем:

$$x'={}^1/_2,\ y'=1,\ z'={}^1/_3,$$

т. е.

$$\frac{1}{x}=\frac{1}{2},\quad \frac{1}{y}=1,\quad \frac{1}{z}=\frac{1}{3}.$$

Отсюда окончательно находим:

$$x=2,\ y=1,\ z=3.$$

Возьмем еще другой пример:

$$\begin{cases} \frac{3}{x}+\frac{2}{y}-\frac{4}{z}=-13 \\ \frac{6}{x}-\frac{3}{y}-\frac{1}{z}=5^1/_2 \\ -\frac{5}{x}+\frac{7}{y}+\frac{2}{z}=3^1/_2. \end{cases}$$

Дроби $\frac{3}{x}$, $\frac{2}{y}$ и т. п. можно рассматривать как произведения: $3\cdot\frac{1}{x}$, $2\cdot\frac{1}{y}$ и т. д. Поэтому, если положим, что $\frac{1}{x}=x'$, $\frac{1}{y}=y'$ и $\frac{1}{z}=z'$, то система изобразится так:

$$\begin{aligned} 3x'+2y'-4z'&=-13 \\ 6x'-3y'-z'&=5^1/_2 \\ -5x'+7y'+2z'&=3^1/_2. \end{aligned}$$

Из этих уравнений находим.

$$x' = 2,\ y' = {}^1/_2,\ z' = 5;$$

значит:

$$\frac{1}{x} = 2, \frac{1}{y} = \frac{1}{2},\ \frac{1}{z} = 5;$$

откуда:

$$x = \frac{1}{2},\ y = 2,\ z = \frac{1}{5}.$$

151. Случай, когда полезно все данные уравнения сложить. Пусть имеем, напр., систему:

$$\begin{cases} x + y = a \\ y + z = b \\ x + z = c \end{cases}$$

Сложив все три уравнения, найдем:

$$2(x + y + z) = a + b + c;\ x + y + z = \frac{a + b + c}{2}.$$

Вычтя из последнего уравнения каждое из данных, получим:

$$z = \frac{a + b + c}{2} - a;\ x = \frac{a + b + c}{2} - b;\ y = \frac{a + b + c}{2} - c.$$

ОТДЕЛ ШЕСТОЙ.

СТЕПЕНИ И КОРНИ.

Глава первая.

Возвышение в квадрат одночленных алгебраических выражений.

152. Определение степени. Напомним, что произведение двух одинаковых чисел aa называется второю степенью (или квадратом) числа a, произведение трех одинаковых чисел aaa называется третьей степенью (или кубом) числа a; вообще произведение n одинаковых чисел $aa... a$ называется n-ю степенью числа a. Действие, посредством которого находится степень данного числа, называется возвышением в степень (вторую, третью и т. д.). Повторяющийся сомножитель называется основанием степени, а число одинаковых сомножителей называется показателем степени.

Сокращенно степени обозначаются так: a^2, a^3, a^4... и т. д.

Мы сначала будем говорить о простейшем случае возвышения в степень, именно о возвышении в квадрат; а после рассмотрим возвышение и в другие степени.

153. Правило знаков при возвышении в квадрат. Из правила умножения относительных чисел следует, что:

$$(+2)^2=(+2)(+2)=+4; \quad (+1/_3)^2=(+1/_3)(+1/_3)=+1/_9;$$
$$(-2)^2=(-2)(-2)=+4; \quad (-1/_3)^2=(-1/_3)(-1/_3)=+1/_9.$$

Вообще:

$$(+a)^2=(+a)(+a)=+a^2;$$
$$(-a)^2=(-a)(-a)=+a^2,$$

Значит, *квадрат всякого относительного числа есть число положительное.*

154. Возвышение в квадрат произведения, степени и дроби. **а)** Пусть требуется возвысить в квадрат произведение нескольких сомножителей, напр. abc. Это значит, что требуется abc умножить на abc. Но чтобы умножить на произведение abc, можно умножить множимое на a, результат умножить на b и что получится умножить еще на c (§ 34, в).

Значит:

$$(abc)^2 = (abc)(abc) = (abc)\,abc = abcabc$$

(мы отбросили последние скобки, так как от этого смысл выражения не изменяется). Теперь, пользуясь сочетательным свойством умножения (§ 34, б), сгруппируем сомножители так:

$$(aa)\,(bb)\,(cc)$$

что можно сокращенно написать: $a^2b^2c^2$.

Значит, *чтобы возвысить произведение в квадрат, можно возвысить в квадрат каждый сомножитель отдельно*[1].

Таким образом:

$$({}^3/_4xy)^2 = {}^9/_{16}x^2y^2; \quad (-0{,}5mn)^2 = +0{,}25m^2n^2;$$

и т. п.

б) Пусть требуется какую-нибудь степень, напр. a^3, возвысить в квадрат. Это можно выполнить так:

$$(a^3)^2 = a^3 \cdot a^3 = a^{3+3} = a^6.$$

Подобно этому: $(x^4)^2 = x^4 \cdot x^4 = x^{4+4} = x^8$.

Значит, *чтобы возвысить степень в квадрат, можно показатель степени умножить на 2.*

Таким образом, применяя эти два правила, будем, напр., иметь:

$$(-3\,{}^3/_4\,ax^2y^3)^2 = (-3\,{}^3/_4)^2\,a^2\,(x^2)^2\,(y^3)^2 = +\,{}^{225}/_{16}\,a^2x^4y^6.$$

в) Пусть требуется возвысить в квадрат какую-нибудь дробь $\frac{a}{b}$. Тогда, применяя правило умножения дроби на дробь, получим:

$$\left(\frac{a}{b}\right)^2 = \frac{a}{b} \cdot \frac{a}{b} = \frac{aa}{bb} = \frac{a^2}{b^2}.$$

---

[1] Для сокращения речи правило это, как и последующее, выражено не полно; надо было бы еще добавить: „и полученные результаты перемножить“. Добавление это само собой подразумевается.

Значит, *чтобы возвысить в квадрат дробь, можно возвысить в квадрат отдельно числитель и знаменатель.*

Пример.

$$\left(\frac{-5ar^2}{4b}\right)^2=\frac{(-5ar^2)^2}{(4b)^2}=\frac{25a^2r^4}{16b^2}.$$

Глава вторая.

Возвышение в квадрат многочлена.

155. Вывод формулы. Пользуясь формулой (§ 61): $(a+b)^2=a^2+2ab+b^2$, мы можем возвысить в квадрат трехчлен $a+b+c$, рассматривая его как двучлен $(a+b)+c$:

$$(a+b+c)^2=[(a+b)+c]^2=(a+b)^2+2(a+b)c+c^2=$$
$$=a^2+2ab+b+2(a+b)c+c^2.$$

Таким образом, с прибавлением к двучлену $a+b$ третьего члена c после возвышения в квадрат прибавились 2 члена: 1) удвоенное произведение суммы первых двух членов на третий член и 2) квадрат третьего члена. Приложим теперь к трехчлену $a+b+c$ еще четвертый член d и возвысим четырехчлен $a+b+c+d$ в квадрат, принимая сумму $a+b+c$ за один член:

$$(a+b+c+d)^2=[(a+b+c)+d]^2=(a+b+c)^2+$$
$$+2(a+b+c)d+d^2.$$

Подставив вместо $(a+b+c)^2$ то выражение, которое мы получили выше, найдем:

$$(a+b+c+d)^2=a^2+2ab+b^2+2(a+b)c+c^2+$$
$$+2(a+b+c)d+d^2.$$

Мы опять замечаем, что с прибавлением нового члена к возвышаемому многочлену в квадрате его прибавляются 2 члена: 1) удвоенное произведение суммы прежних членов на новый член и 2) квадрат нового члена. Очевидно, что такое прибавление двух членов будет итти и дальше по мере прибавления новых членов к возвышаемому многочлену. Значит:

Квадрат многочлена равен: квадрату 1-го члена, плюс удвоенное произведение 1-го члена на 2-й, плюс квадрат 2-го члена, плюс удвоенное произведение суммы первых двух членов на 3-й, плюс квадрат 3-го члена, плюс удвоенное произведение суммы первых трех членов на 4-й, плюс квадрат 4-го члена, и т. д. Конечно, члены многочлена могут быть и отрицательными.

156. Замечание о знаках. В окончательном результате со знаком плюс окажутся, во-первых, квадраты всех членов многочлена и, во-вторых, те удвоенные произведения, которые произошли от умножения членов с одинаковыми знаками.

Пример.

$$\begin{gathered}({}^1/_2x^2 - 4x - 3)^2 = ({}^1/_2x^2)^2 + 2\,({}^1/_2x^2)\,(-4x) + (-4x)^2 + \\ + 2\,({}^1/_2x^2 - 4x)\,(-3) + (-3)^2 = {}^1/_4x^4 - 4x^3 + 16x^2 - 3x^2 + \\ + 24x + 9 = {}^1/_4x^4 - 4x^3 + 13x^2 + 24x + 9.\end{gathered}$$

157. Сокращенное возвышение в квадрат целых чисел. Пользуясь формулою квадрата многочлена, можно возвышать в квадрат всякое целое число иначе, чем обыкновенным умножением. Пусть, напр., требуется возвысить в квадрат 86. Разложим это число на разряды:

$$86 = 80 + 6 = 8\ \text{дес.} + 6\ \text{ед.}$$

Теперь по формуле квадрата суммы двух чисел можем написать:

$$(8\ \text{дес.} + 6\ \text{ед.})^2 = (8\ \text{дес.})^2 + 2\,(8\ \text{дес.})\,(6\ \text{ед.}) + (6\ \text{ед.})^2.$$

Чтобы быстрее вычислить эту сумму, примем во внимание, что квадрат десятков составляет сотни (но могут быть и тысячи); напр. 8 дес. в квадрате образуют 64 сотни, так как $80^2 = 6400$; произведение десятков на единицы составляет десятки (но могут быть и сотни), напр. 3 дес. $\times$ 5 ед. = 15 дес., так как $30 \cdot 5 = 150$; и квадрат единиц составляет единицы (но могут быть и десятки), напр. 9 ед. в квадрате = 81 ед. Поэтому вычисление всего удобнее расположить так:

$$\begin{array}{rl} 86^2 = 64 & \text{. . . . сотен (квадрат 8 дес.)} \\ 96 & \text{. . . десятков (удв. произв. 8 дес. на 6 ед.)} \\ \underline{36} & \text{. . . единиц (квадрат 6 ед.),} \\ 7396 & \end{array}$$

т. е. мы пишем сначала квадрат первой цифры (сотни); под этим числом пишем удвоенное произведение первой цифры на вторую (десятки), наблюдая при этом, чтобы последняя цифра этого произведения стояла на одно место правее последней цифры верхнего числа; далее, снова отступив последней цифрой на одно место вправо, ставим квадрат второй цифры (единицы); и все написанные числа складываем в одну сумму. Конечно, можно было бы дополнить эти числа надлежащим количеством нулей, т. е. написать так:

$$\begin{array}{r} 86^2 = 6400 \\ 960 \\ 36 \\ \hline 7396, \end{array}$$

но это бесполезно, если только будем правильно подписывать числа друг под другом, отступая каждый раз (последней цифрой) на одно место вправо.

Пусть еще требуется возвысить в квадрат 238. Так как:

$$238 = 2 \text{ сот.} + 3 \text{ дес.} + 8 \text{ ед.},$$

то

$$\begin{aligned} 238^2 = {} & (2 \text{ сот.})^2 + 2\,(2 \text{ сот.})\,(3 \text{ дес.}) + (3 \text{ дес.})^2 \\ & + 2\,(\underbrace{2 \text{ сот.} + 3 \text{ дес.}}_{23 \text{ дес.}})\,(8 \text{ ед.}) + (8 \text{ ед.})^2. \end{aligned}$$

Но сотни в квадрате дают десятки тысяч (напр., 5 сот. в квадрате будет 25 дес. тысяч, так как $500^2 = 250\,000$), произведение сотен на десятки дает тысячи (напр. $500 \cdot 30 = 15\,000$) и т. д.

Значит:

$$\begin{array}{r l} 238^2 = 4 & \ldots \text{дес. тысяч (квадрат 2 сот.)} \\ 12 & \ldots \text{тысяч (удв. произв. 2 сот. на 3 дес.)} \\ 9 & \ldots \text{сотен (квадрат 3 дес.)} \\ 368 & \ldots \text{десятков (удв. произв. 23 дес. на 8 ед.)} \\ 64 & \ldots \text{единицу (квадрат 8 ед.).} \\ \hline 56644 & \end{array}$$

Примеры.

1) $$\begin{array}{r} 94^2 = 81 \\ 72 \\ 16 \\ \hline 8836 \end{array}$$

2) $$\begin{array}{r} 309^2 = 9 \\ 0 \\ 0 \\ 540 \\ 81 \\ \hline 95481 \end{array}$$

3) $$\begin{array}{r} 5742^2 = 25 \\ 70 \\ 49 \\ 456 \\ 16 \\ 2296 \\ 4 \\ \hline 32970564. \end{array}$$

Глава третья.

Графическое изображение функций:

$y = x^2$ и $y = ax^2$.

158. График функции $y = x^2$. Проследим, как при изменении возвышаемого числа x изменяется квадрат его x^2 (напр., как при изменении стороны квадрата изменяется его площадь). Для этого предварительно обратим внимание на следующие особенности функции $y = x^2$.

а) При всяком значении x функция всегда возможна и всегда получает только одно определенное значение. Напр. при $x = -10$ функция будет $(-10)^2 = 100$, при $x = 1000$ функция будет $1000^2 = 1\,000\,000$, и т. п.

б) Так как $(-x)^2 = x^2$, то при двух значениях x, отличающихся только знаками, получаются два одинаковые положительные значения y; напр. при $x = -2$ и при $x = +2$ значение y будет одно и то же, именно 4. Отрицательных значений для y никогда не получается.

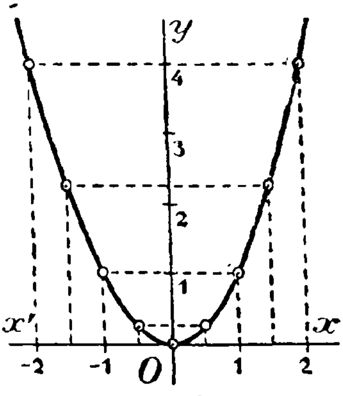
в) Если абсолютная величина x неограниченно увеличивается, то и y неограниченно увеличивается. Так, если для x будем давать ряд неограниченно возрастающих положительных значений: 1, 2, 3, 4... или ряд неограниченно убывающих отрицательных значений: -1, -2, -3, -4..., то для y получим ряд неограниченно возрастающих значений: 1, 4, 9, 16, 25... Это кратко выражают, говоря, что при $x = +\infty$ и при $x = -\infty$ функция y делается $+\infty$.

г) Очень малому приращению переменного числа x соответствует и очень малое приращение функции y. Так, если значению $x = 2$ дадим приращение, положим, 0,1 (т. е. вместо $x = 2$ возьмем $x = 2{,}1$), то y вместо $2^2 = 4$ сделается равным $(2 + 0{,}1)^2 = 2^2 + 2 \cdot 2 \cdot 0{,}1 + 0{,}1^2$. Значит, y увеличится на $2 \cdot 2 \cdot 0{,}1 + 0{,}1^2 = 0{,}41$. Если тому же значению x дадим еще меньшее приращение, положим, 0,01, то y сделается равным $(2 + 0{,}01)^2 = 2^2 + 2 \cdot 2 \cdot 0.01 + 0{,}01^2$. Значит, тогда y увеличится на $2 \cdot 2 \cdot 0{,}01 + 0{,}01^2 = 0{,}0101$, т. е. увеличится меньше, чем прежде. Вообще, чем на меньшую дробь мы увеличим x, тем на меньшее число увеличится y. Таким образом, если представим себе, что x увеличивается (положим от значения 2) непрерывно, переходя через все значения, большие 2, то y будет увеличиваться тоже непрерывно, переходя через все значения, большие 4.

Заметив все эти свойства, составим таблицу значений функции $y=x^2$, напр., такую:

x	$-\infty$	...	-2	$-1{,}5$	-1	$-0{,}5$	0	$0{,}5$	1	$1{,}5$	2	...	$+\infty$
y	$+\infty$	...	4	$2{,}25$	1	$0{,}25$	0	0.25	1	$2{,}25$	4	...	$+\infty$

Изобразим теперь эти значения на чертеже (40-м) в виде точек, абсциссы которых будут выписанные значения x, а ординаты соответствующие значения y (на чертеже за единицу длины мы приняли сантиметр); полученные точки обведем кривою. Кривая эта называется параболой. Рассмотрим некоторые ее свойства.



Черт. 40.

а) Парабола есть кривая непрерывная, так как при непрерывном изменении абсциссы x (как в положительном направлении, так и в отрицательном) ордината, как мы видели сейчас, изменяется тоже непрерывно.

б) Вся кривая расположена по одну сторону от оси x-ов, именно по ту сторону, по какую лежат положительные значения ординат.

в) Парабола подразделяется осью y ов на две части (ветви). Точка O, в которой эти ветви сходятся, называется вершиною параболы. Эта точка есть единственная общая у параболы и оси x-ов; значит, в этой точке парабола касается оси x-ов.

г) Обе ветви бесконечны, так как x и y могут увеличиваться беспредельно. Ветви поднимаются от оси x-ов неограниченно вверх, удаляясь в то же время неограниченно от оси y-ов вправо и влево.

д) Ось y-ов служит для параболы осью симметрии, так что, перегнув чертеж по этой оси так, чтобы левая половина чертежа упала на правую, мы увидим, что обе ветви совместятся; напр. точка с абсциссой -2 и с ординатой 4 совместится с точкой, имеющей абсциссу $+2$ и ту же ординату 4.

е) При $x=0$ ордината тоже равна 0. Значит, при $x=0$ функция имеет наименьшее значение из всех возможных. Наибольшего значения функция не имеет, так как ординаты кривой увеличиваются беспредельно.

159. График функции вида $y=ax^2$. Предположим сначала, что a есть число положительное. Возьмем, напр., такие 2 функции:

$$1)\ y=1^1/_2\,x^2; \qquad 2)\ y={}^1/_3\,x^2.$$

Составим таблицы значений этих функции, напр., такие:

1)

x	-2	-1	0	1	2	...
y	6	$1^1/_2$	0	$1^1/_2$	6	...

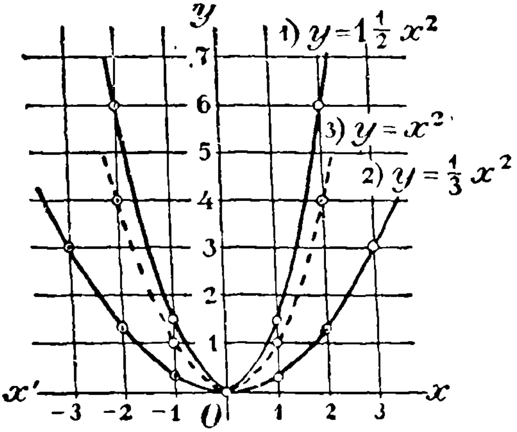
2)

x	-3	-2	-1	0	1	2	...
y	3	$1^1/_3$	$^1/_3$	0	$^1/_3$	$1^1/_3$	...

Нанесем все эти значения на чертеж (41-й) и проведем кривые. Для сравнения мы поместили на том же чертеже (прерывистой линией) еще график функции:

$$3)\ y=x^2.$$

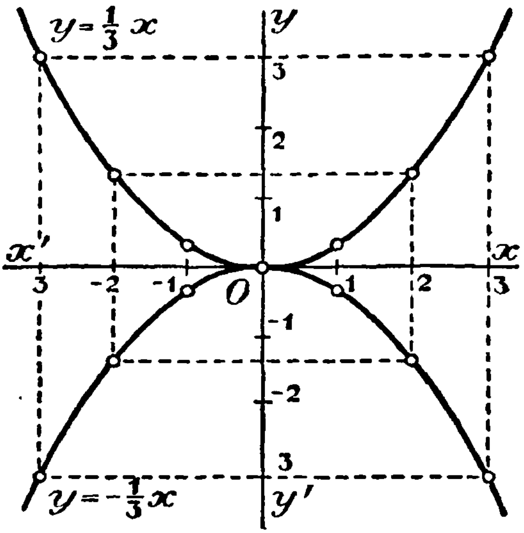
x	-2	-1	0	1	2	...
y	4	1	0	1	4	...



Черт. 41.

Из чертежа видно, что при одной и той же абсциссе ордината 1-й кривой в $1^1/_2$ раза больше, а ордината 2-й кривой в 3 раза меньше, чем ордината 3-й кривой. Вследствие этого все такие кривые имеют общий характер: бесконечные непрерывные ветви, ось симметрии и пр., только при $a>1$ ветви кривой более приподняты вверх, а при $a<1$ они более отогнуты книзу, чем у кривой $y=x^2$. Все такие кривые называются **параболами**.

Предположим теперь, что коэффициент a будет число отрицательное. Пусть, напр., $y = -{}^1/_3x^2$. Сравнивая эту функцию с такой: $y = +{}^1/_3x^2$, замечаем, что при одном и том же значении x обе функции имеют одну и ту же абсолютную величину, но противоположны по знаку. Поэтому на чертеже (42-м) для функции $y = -{}^1/_3x^2$ получится такая же парабола, как и для функции $y = +{}^1/_3x^2$, только расположенная под осью x-ов симметрично с параболой $y = {}^1/_3x^2$. В этом случае все значения функции отрицательны, кроме одного, равного нулю при $x = 0$; это последнее значение является **наибольшим** из всех.



Черт. 42.

Замечание. Если зависимость между двумя переменными величинами y и x выражается равенством: $y = ax^2$, где a какое-нибудь постоянное число, то можно сказать, что величина y **пропорциональна квадрату** величины x, так как с увеличением или уменьшением x в 2 раза, в 3 раза и т. д. величина y увеличивается или уменьшается в 4 раза, в 9 раз, в 16 раз и т. д.

Напр. площадь круга равна πR^2, где R есть радиус круга и π постоянное число (равное приблизительно 3,14); поэтому можно сказать, что площадь круга пропорциональна квадрату его радиуса.

Глава четвертая.

Возвышение в куб и в другие степени одночленных алгебраических выражений.

160. Правило знаков при возвышении в степень. Из правила умножения относительных чисел следует, что

$$(-5)^3 = (-5)(-5)(-5) = -125;$$
$$(-{}^1/_2)^4 = (-{}^1/_2)(-{}^1/_2)(-{}^1/_2)(-{}^1/_2) = +{}^1/_{16};$$

$$(-1)^5 = (-1)(-1)(-1)(-1)(-1) = -1;$$
$$(-1)^6 = (-1)(-1)(-1)(-1)(-1)(-1) = +1; \text{ и т. п.}$$

Значит, *от возвышения отрицательного числа в степень с четным показателем получается положительное число, а от возвышения его в степень с нечетным показателем получается отрицательное число.*

161. Возвышение в степень произведения, степени и дроби. При возвышении произведения степени и дроби в какую-нибудь степень мы можем поступать так же, как и при возвышении в квадрат (§ 154). Так:

$$(abc)^3 = (abc)(abc)(abc) = abc \cdot abc \cdot abc = (aaa)(bbb)(ccc) = a^3b^3c^3;$$

$$(x^5)^3 = (x^5)(x^5)(x^5) = x^{5+5+5} = x^{15};$$

$$\left(\frac{a}{b}\right)^4 = \frac{a}{b} \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{a}{b} = \frac{aaaa}{bbbb} = \frac{a^4}{b^4}$$

Таким образом: 1) *чтобы возвысить в степень произведение можно возвысить в эту степень каждый сомножитель отдельно,*

2) *чтобы возвысить степень в другую степень, можно перемножить показатели этих степеней;*

3) *чтобы возвысить дробь в степень, можно возвысить в эту степень отдельно числитель и знаменатель.*

Примеры.

1) $(-2x^2y^3)^3 = -8x^6y^9$.

2) $(-3ab^2c^3)^4 = +81a^4b^8c^{12}$.

3) $\left(\frac{-3ax^2}{4bc^3}\right)^3 = \frac{-27a^3x^6}{64b^3c^9} = -\frac{27a^3x^6}{64b^3c^9}$.

Глава пятая.

Графическое изображение функций:

$y = x^3$ и $y = ax^3$.

162. График функции $y = x^3$. Рассмотрим, как при изменении возвышаемого числа изменяется куб его (напр., как при изменении ребра куба изменяется его объем). Для этого предварительно укажем следующие особенности функции $y = x^3$ (напоминающие свойства функции $y = x^2$, рассмотренные нами раньше, § 158):

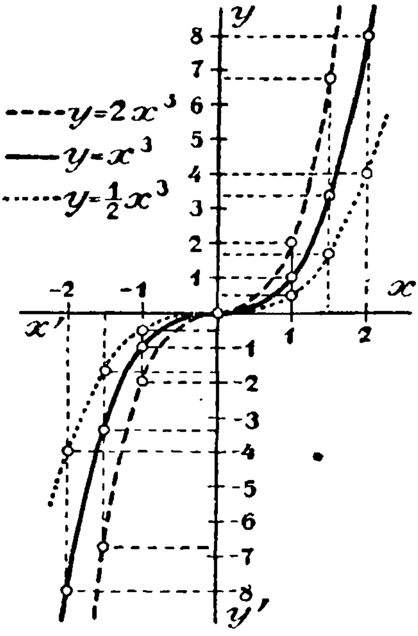
а) При всяком значении x функция $y = x^3$ возможна и имеет единственное значение; так, $(+5)^3 = +125$ и никакому другому числу куб числа $+5$ равняться не может. Подобно этому $(-0{,}1)^3 = -0{,}001$ и никакому другому числу куб числа $-0{,}1$ равняться не может.

б) При двух значениях x, отличающихся только знаками, функция x^3 получает значения, также отличающиеся друг от друга только знаками; так, при $x=2$ функция x^3 равна 8, а при $x=-2$ она равна -8.

в) При возрастании x функция x^3 возрастает и притом быстрее, чем x, и даже быстрее, чем x^2; так при

$$x = -2,\ -1,\ 0,\ +1,\ +2,\ +3,\ +4\ldots$$
$$x^3 \text{ будет} = -8,\ -1,\ 0,\ +1,\ +8,\ +27,\ +64\ldots$$

г) Очень малому приращению переменного числа x соответствует и очень малое приращение функции x^3. Так, если значение $x=2$ увеличим на дробь 0,01, т. е. если вместо $x=2$ возьмем $x=2{,}01$, то функция y будет не 2^3 (т. е. не 8), а $2{,}01^3$, что составит 8,120601. Значит, функция эта увеличится тогда на 0,120601. Если значение $x=2$ увеличим еще меньше, напр. на 0,001, то x^3 сделается равным $2{,}001^3$, что составит 8,012006001, и, значит, y увеличится только на 0,012006001. Мы видим, таким образом, что если приращение переменного числа x будет все меньше и меньше, то и приращение x^3 будет все меньше и меньше.



Черт. 43.

Заметив это свойство функции $y=x^3$, начертим ее график. Для этого предварительно составим таблицу значений этой функции, напр., такую:

x	$^1/_2$	1	$1^1/_2$	2	$2^1/_2$	3	. . .
y	$^1/_8$	1	$3^3/_8$	8	$15^5/_8$	27	. . .

Для отрицательных значений x получатся для y те же числа, которые указаны в этой таблице, только со знаком $-$. Построим теперь точки, соответствующие взятым значениям x и y (черт. 43). Вследствие того, что ординаты y растут значительно быстрее абсцисс, удобнее на чертеже взять для ординат единицу длины меньшую, чем для абсцисс. Напр. для ординат взять $^1/_2$ *см*, а для абсцисс 1 *см* (как у нас на чертеже). Тогда, конечно, кривая окажется сжатою в вертикальном направлении. На построенном графике все свойства функции $y=x^3$, которые мы сейчас указали, представляются вполне наглядными.

163. График функции $y=ax^3$. Возьмем такие две функции:

$$1)\ y={}^1/_2x^3; \qquad 2)\ y=2x^3.$$

Если сравним эти функции с более простой: $y=x^3$, то заметим, что при одном и том же значении x первая функция получает значения вдвое меньшие, а вторая вдвое большие, чем функция $y=x^3$; во всем остальном эти три функции сходны между собой. Графики их изображены для сравнения на одном и том же чертеже (43). Кривые эти называются параболами 3-й степени.

Глава шестая.

Основные свойства извлечения корня.

164. Задачи. **а)** Найти сторону квадрата, которого площадь равнялась бы площади прямоугольника с основанием 16 *см* и с высотою 4 *см*.

Обозначив сторону искомого квадрата буквою x (*см*), получим такое уравнение:

$$x^2=16\cdot4,\ \text{т. е.}\ x^2=64.$$

Мы видим таким образом, что x есть такое число, которое, будучи возвышено во вторую степень, дает в результате **64**. Такое число называется корнем второй степени из 64. Оно равно $+8$ или -8, так как $(+8)^2=64$ и $(-8)^2=64$. Отрицательное число -8 для нашей задачи не годится, так как сторона квадрата должна выразиться обыкновенным арифметическим числом.

б) Свинцовый кусок, весящий 1 *кг* 375 *г* (1375 *г*), имеет форму куба. Как велико ребро этого куба, если известно, что 1 *куб. см* свинца весит 11 граммов?

Пусть длина ребра куба будет x *см*. Тогда его объем будет равен x^3 *куб. см*, а вес его окажется $11x^3$ *г*.

Значит: $11x^3=1375$; $x^3=1375:11=125$.

Мы видим таким образом, что x есть такое число, которое, будучи возвышено в третью степень, составляет 125. Такое число называется **корнем третьей степени** из 125. Оно, как нетрудно догадаться, равно 5, так как $5^3 = 5 \cdot 5 \cdot 5 = 125$. Значит, ребро куба, о котором говорится в задаче, имеет длину в 5 *см.*

165. Определение корня. Корнем второй степени (или квадратным) из числа a называется такое число, которого квадрат равняется a. Так, квадратный корень из 49 есть 7, а также и -7, так как $7^2 = 49$ и $(-7)^2 = 49$. Корнем третьей степени (кубичным) из числа a называется такое число, которого куб равняется a. Так, кубичный корень из -125 есть -5, так как $(-5)^3 = (-5)(-5)(-5) = -125$.

Вообще *корнем* n*-ой степени из числа* a *называется такое число, которого* n*-ая степень равна* a.

Число n, означающее, какой степени находится корень, называется **показателем корня.**

Корень обозначается знаком $\sqrt{}$ (знак радикала[1]), т. е. знак корня). Под горизонтальной чертой его пишут то число, из которого корень отыскивается (**подкоренное** число), а над отверстием угла ставят показатель корня. Так:

корень кубичный из 27 обозначается . . . . . $\sqrt[3]{27}$;

корень четвертой степени из 32 обозначается . . . $\sqrt[4]{32}$.

Показатель квадратного корня принято не писать вовсе, напр. вместо $\sqrt[2]{16}$, пишут $\sqrt{16}$.

Действие, посредством которого отыскивается корень, называется **извлечением корня**; оно обратно возвышению в степень, так как посредством этого действия отыскивается то, что дано при возвышении в степень, именно основание степени, а дано то, что при возвышении в степень отыскивается, именно сама степень. Поэтому *правильность извлечения корня мы можем всегда поверять возвышением в степень.* Напр., чтобы проверить равенство: $\sqrt[3]{125} = 5$, достаточно 5 возвысить в куб: получив подкоренное число 125, мы заключаем, что корень кубичный из 125 извлечен правильно.

---

[1] Латинское слово radix означает **корень**. Знак $\sqrt{}$ впервые введен в XV столетии.

Чтобы убедиться в верности этого равенства, возвысим правую часть его в квадрат (по теореме: чтобы возвысить в степень произведение...):

$$(\sqrt{a}\sqrt{b}\sqrt{c})^2=(\sqrt{a})^2(\sqrt{b})^2(\sqrt{c})^2.$$

Но, согласно определению корня,

$$(\sqrt{a})^2=a,\ (\sqrt{b})^2=b,\ (\sqrt{c})^2=c.$$

Следовательно

$$(\sqrt{a}\sqrt{b}\sqrt{c})^2=abc.$$

Если же квадрат произведения $\sqrt{a}\sqrt{b}\sqrt{c}$ равен abc, то это значит, что произведение это равно квадратному корню из abc.

Подобно этому:

$$\sqrt[3]{abc}=\sqrt[3]{a}\sqrt[3]{b}\sqrt[3]{c},$$

так как

$$\left(\sqrt[2]{a}\sqrt[3]{b}\sqrt[3]{c}\right)^3=\left(\sqrt[3]{a}\right)^3\left(\sqrt[3]{b}\right)^3\left(\sqrt[3]{c}\right)^3=abc.$$

Значит, *чтобы извлечь корень из произведения, достаточно извлечь его из каждого сомножителя отдельно.*

б) Легко убедиться поверкою, что следующие равенства верны:

$$\sqrt{a^4}=a^2,\ \text{потому что}\ (a^2)^2=a^4;$$

$$\sqrt[3]{x^{12}}=x^4,\quad \text{„} \quad \text{„} \quad (x^4)^3=x^{12};\ \text{и т. п.}$$

Значит, *чтобы извлечь корень из степени, показатель которой делится на показатель корня, можно разделить показатель степени на показатель корня.*

в) Верны будут также и следующие равенства:

$$\sqrt{\frac{9}{16}}=\frac{\sqrt{9}}{\sqrt{16}}=\frac{3}{4},\ \text{потому что}\ \left(\frac{3}{4}\right)^2=\frac{3^2}{4^2}=\frac{9}{16};$$

$$\sqrt[3]{\frac{8}{27}}=\frac{\sqrt[3]{8}}{\sqrt[3]{27}}=\frac{2}{3},\quad \text{„} \quad \text{„} \quad \left(\frac{2}{3}\right)^3=\frac{2^3}{3^3}=\frac{8}{27}.$$

Значит, *чтобы извлечь корень из дроби, можно извлечь его из числителя и знаменателя отдельно.*

Заметим, что в этих истинах предполагается, что речь идет о корнях арифметических.

Примеры.

1) $\sqrt{9a^4b^6} = \sqrt{9}\,\sqrt{a^4}\,\sqrt{b^6} = 3a^2b^3$;

2) $\sqrt[3]{125a^6x^9} = \sqrt[3]{125}\,\sqrt[3]{a^6}\,\sqrt[3]{x^9} = 5a^2x^3$.

Замечание. Если искомый корень четной степени и предполагается алгебраический, то перед найденным результатом надо поставить двойной знак $\pm$. Так,

$$\sqrt{9x^4} = \pm 3x^2.$$

169. Простейшие преобразования радикалов. а) Вынесение множителей за знак радикала. Если подкоренное выражение разлагается на такие множители, что из некоторых из них можно извлечь корень, то такие множители, по извлечении из них корня, могут быть написаны перед знаком радикала (могут быть вынесены за знак радикала).

Примеры.

1) $\sqrt{a^3} = \sqrt{a^2a} = \sqrt{a^2}\,\sqrt{a} = a\sqrt{a}$.

2) $\sqrt{24a^4x^3} = \sqrt{4\cdot 6a^4x^2x} = 2a^2x\sqrt{6x}$.

3) $\sqrt[3]{16x^4} = \sqrt[3]{8\cdot 2x^3x} = 2x\sqrt[3]{2x}$.

б) Подведение множителей под знак радикала. Иногда бывает полезно, наоборот, подвести под знак радикала множители, стоящие перед ним; для этого достаточно возвысить такие множители в степень, показатель которой равен показателю радикала, а затем написать множителями под знаком радикала.

Примеры.

1) $a^2\sqrt{a} = \sqrt{(a^2)^2a} = \sqrt{a^4a} = \sqrt{a^5}$.

2) $2x\sqrt[3]{x} = \sqrt[3]{(2x)^3x} = \sqrt[3]{8x^3x} = \sqrt[3]{8x^4}$.

в) Освобождение подкоренного выражения от знаменателей. Покажем это на следующих примерах:

1) $\sqrt{\frac{3x}{5}}$. Преобразуем дробь так, чтобы из знаменателя можно было извлечь квадратный корень. Для этого умножим оба члена дроби на 5:

$$\sqrt{\frac{3x}{5}} = \sqrt{\frac{3x\cdot 5}{5^2}} = \frac{\sqrt{15x}}{\sqrt{5^2}} = \frac{\sqrt{15x}}{5} = \frac{1}{5}\sqrt{15x}.$$

2) $\sqrt{\frac{3}{2ax^3}}$. Умножим оба члена дроби на 2, на a и на x, т. на $2ax$:

$$\sqrt{\frac{3}{2ax^3}}=\sqrt{\frac{3\cdot 2ax}{4a^2x^4}}=\frac{\sqrt{6ax}}{\sqrt{4a^2x^4}}=\frac{\sqrt{6ax}}{2ax^2}=\frac{1}{2ax^2}\sqrt{6ax}.$$

Замечание. Если требуется извлечь корень из алгебраической суммы, то было бы ошибочно извлечь его из каждого слагаемого отдельно. Напр. $\sqrt{9+16}=\sqrt{25}=5$, тогда как $\sqrt{9}+\sqrt{16}=3+4=7$; значит, действие извлечения корня по отношению к сложению (и вычитанию) *не обладает распределительным свойством* (как и возвышение в степень, § 61, замечание).

ОТДЕЛ СЕДЬМОЙ.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ КВАДРАТНОГО КОРНЯ ИЗ ЧИСЕЛ.

Глава первая.

Извлечение из данного целого числа наибольшего целого квадратного корня.

170. Предварительные замечания. а) Так как мы будем говорить об извлечении только квадратного корня, то для сокращения речи в этой главе мы вместо „квадратный“ корень будем говорить просто „корень“.

б) Если возвысим в квадрат числа натурального ряда: 1, 2, 3, 4, 5 . . . , то получим такую таблицу квадратов:

1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121, 144...

Очевидно, имеется очень много целых чисел, которые в этой таблице не находятся; из таких чисел, конечно, нельзя извлечь целый корень. Поэтому, если требуется извлечь корень из какого-нибудь целого числа, напр. требуется найти $\sqrt{4082}$, то мы условимся это требование понимать так: извлечь целый корень из 4082, если это возможно; если же нельзя, то мы должны найти наибольшее целое число, квадрат которого заключается в 4082 (такое число есть 63, так как $63^2 = 3969$, а $64^2 = 4096$).

в) Если данное число меньше 100, то корень из него находится по таблице умножения; так, $\sqrt{60}$ будет 7, так как семью 7 равно 49, что меньше 60, а восемью 8 составляет 64, что больше 60.

171. Извлечение корня из числа, меньшего 10000, но большего 100. Пусть надо найти $\sqrt{4082}$. Так как это число меньше

10 000, то корень из него меньше $\sqrt{10\,000}=100$. С другой стороны, данное число больше 100; значит, корень из него больше (или равен 10)[1]. Но всякое число, которое больше 10, но меньше 100, имеет 2 цифры; значит, искомый корень есть сумма

десятки + единицы,

и поэтому квадрат его должен равняться сумме:

$$(\text{дес.})^2+2\cdot(\text{дес.})\cdot(\text{ед.})+(\text{ед.})^2.$$

$$\begin{array}{l}\sqrt{40'82}=6\\ \ \ 36\\ \ \ -\\ \ \ \ 48'2\end{array}$$

Сумма эта должна быть наибольшим квадратом, заключающимся в 4082. Так как (десятки)^2 составляют сотни, то квадрат десятков надо искать в сотнях данного числа. Сотен в данном числе 40 (мы находим их число, отделив запятой две цифры справа). Но в 40 заключается несколько целых квадратов: 36, 25, 16 ... и др. Возьмем из них наибольший, 36, и допустим, что квадрат десятков корня будет равен именно этому наибольшему квадрату. Тогда число десятков в корне должно быть 6. Проверим теперь, что это всегда должно быть так, т. е. всегда *число десятков корня равно наибольшему целому корню из числа сотен подкоренного числа.* Действительно, в нашем примере число десятков корня не может быть больше 6, так как (7 дес.)$^2=49$ сотен, что превосходит 4082. Но оно не может быть и меньше 6, так как 5 дес. (с единицами) меньше 6 дес., а между тем (6 дес.)$^2=36$ сотен, что меньше 4082. А так как мы ищем наибольший целый корень, то мы не должны брать для корня 5 дес., когда и 6 десятков оказывается не много. Итак, мы нашли число десятков корня, именно 6. Пишем эту цифру направо от знака =, запомнив, что она означает десятки корня. Возвысив ее в квадрат, получим 36 сотен. Вычитаем эти 36 сотен из 40 сотен подкоренного числа и сносим две остальные цифры данного числа. В остатке 482 должны содержаться $2\cdot(6\text{ дес.})\cdot(\text{ед.})+(\text{ед.})^2$. Произведение $(6\text{ дес.})\cdot(\text{ед.})$ должно составлять десятки; поэтому удвоенное произведение десятков на единицы надо искать в десятках остатка, т. е. в 48 (мы получим число их, отделив в остатке 48'2 одну цифру справа). Удвоенные десятки корня составляют 12. Значит, если 12 умножим на единицы корня (которые пока неизвестны), то мы должны получить число, содержащееся в 48. Поэтому мы разделим 48 на 12. Для этого налево от остатка проводим вертикальную черту и за нею (отступив от черты на одно место влево для цели, которая сейчас обнаружится) напишем удвоенную первую цифру корня, т. е. 12, и на нее разделим 48. В частном получим 4. Однако, заранее нельзя ручаться, что цифру 4 можно принять за единицы корня, так как мы сейчас разделили на 12 все число десятков остатка, тогда как некоторая часть из них может и не принадлежать удвоенному произведению десятков на единицы, а входит в состав квадрата единиц. Поэтому цифра 4 может оказаться велика. Надо ее испытать. Она, очевидно, годится в том случае, если сумма $2\cdot(6\ \text{дес.})\cdot 4+4^2$ окажется не больше остатка 482. Сумму это мы можем вычислить сразу таким простым приемом: за вертикальной чертой к удвоенной цифре корня (к 12) приписываем справа цифру 4 (поэтому-то мы и отступили от черты на одно место) и на нее же умножим полученное число (124 на 4). Действительно, производя это умножение, мы умножаем 4 на 4, значит, находим квадрат единиц корня; затем мы умножаем 12 десятков на 4, значит находим удвоенное произведение десятков корня на единицы. В результате получаем сразу сумму того и другого. Полученное произведение оказалось 496, что больше остатка 482; значит, цифра 4 велика.

---

[1] *Если бы, напр., требовалось найти* $\sqrt{120}$, *то хотя число* $120>100$, *однако* $\sqrt{120}$ *равен* 10, *так как* $11^2=121$.

$$\sqrt{40'82}=6$$
$$\begin{array}{r|l} \multicolumn{2}{l}{\quad 36} \\ \hline 124 & 48'2 \\ 4 & 49\,6 \end{array}$$

$$\sqrt{40'82}=63$$
$$\begin{array}{r|l} \multicolumn{2}{l}{\quad 36} \\ \hline 3 & 48'2 \\ 3 & 36\,9 \\ \cline{2-2} & 11\,3 \end{array}$$

Тогда испытаем таким же образом следующую меньшую цифру 3 Для этого сотрем цифру 4 и произведение 496 и вместо цифры 4 поставим 3 и умножим 123 на 3. Произведение 369 оказалось меньше остатка 492; значит, цифра 3 годится (если бы случилось, что и эта цифра велика, тогда надо было бы испытать следующую меньшую цифру 2). Пишем цифру 3 в корне направо от цифры десятков. Последний остаток 113 показывает избыток данного числа над наибольшим целым квадратом, заключающимся в нем. Для поверки мы возвысили в квадрат 63 и к результату приложили 113; так как в сумме получилось данное число 4082, то действие сделано верно.

$$\begin{array}{rr} & 62^2=36 \\ & 36 \\ & 9 \\ \hline + & 3969 \\ & 113 \\ \hline & 4082 \end{array}$$

Примеры.

$$1)\ \sqrt{12'25}=35 \qquad \begin{array}{r|l} \multicolumn{1}{r}{} & 9 \\ \cline{2-2} 65 & 32'5 \\ 5 & 32\,5 \\ \cline{2-2} \multicolumn{1}{r}{} & \multicolumn{1}{l}{\ \ 0} \end{array}$$

$$2)\ \sqrt{86'55}=93 \qquad \begin{array}{r|l} \multicolumn{1}{r}{} & 81 \\ \cline{2-2} 183 & 55'5 \\ 3 & 54\,9 \\ \cline{2-2} \multicolumn{1}{r}{} & \multicolumn{1}{r}{6} \end{array}$$

$$3)\ \sqrt{16'05}=40 \qquad \begin{array}{r|l} \multicolumn{1}{r}{} & 16 \\ \cline{1-2} 8 & 0'5 \\ & \end{array}$$

$$4)\ \sqrt{8'72}=29 \qquad \begin{array}{r|l} \multicolumn{1}{r}{} & 4 \\ \cline{2-2} 49 & 47'2 \\ 9 & 44\,1 \\ \cline{2-2} \multicolumn{1}{r}{} & \multicolumn{1}{l}{\ \ 3\,1} \end{array}$$

$$5)\ \sqrt{64'00}=80 \qquad \begin{array}{l} 64 \\ \hline \ \ 00 \end{array}$$

В примере 4-м при делении 47 десятков остатка на 4, мы получаем в частном 11. Но так как цифра единиц корня не может быть двузначным числом 11 или 10, то надо прямо испытать цифру 9.

В примере 5-м после вычитания из первой грани квадрата 8 остаток оказывается 0, и следующая грань тоже состоит из нулей. Это показывает, что искомый корень состоит только из 8 десятков, и потому на место единиц надо поставить нуль.

172. Извлечение корня из числа, большего 10 000. Пусть требуется найти $\sqrt{35782}$. Так как подкоренное число превосходит 10 000, то корень из него больше $\sqrt{10\,000}=100$ и, следовательно, он состоит из 3 цифр или более. Из скольких бы цифр он ни состоял, мы можем его всегда рассматривать как сумму только десятков и единиц. Если, напр., корень оказался бы 482, то мы можем его считать за сумму 48 дес. $+$ 2 ед. Тогда квадрат корня будет состоять из 3 слагаемых:

$$(\text{дес.})^2+2\cdot(\text{дес.})(\text{ед.})+(\text{ед.})^2.$$

Теперь мы можем рассуждать совершенно так же, как и при нахождении $\sqrt{4082}$ (в предыдущем параграфе). Разница будет только та, что для нахождения десятков корня из 4082 мы должны были извлечь корень из 40, и это можно было сделать по таблице умножения; теперь же для получения десятков $\sqrt{357'82}$ нам придется извлечь корень из 357, что по таблице умножения нельзя выполнить. Но мы можем найти $\sqrt{357}$ тем приемом, который был описан в предыдущем параграфе, так как

$$\begin{array}{r|l}
\multicolumn{2}{l}{\sqrt{3'57'82}=189} \\
 & 1 \\
\hline
23 & 25'7 \\
8 & 22\,4 \\
\hline
369 & 338'2 \\
9 & 332\,1 \\
\hline
 & 6\,1
\end{array}$$

число 357 < 10 000. Наибольший целый корень из 357 оказывается 18. Значит, в $\sqrt{3'57'82}$ должно быть 18 десятков. Чтобы найти единицы, надо из 3'57'82 вычесть квадрат 18 десятков, для чего достаточно вычесть квадрат 18 из 357 сотен и к остатку снести 2 последние цифры подкоренного числа. Остаток от вычитания квадрата 18 из 357 у нас уже есть: это 33. Значит, для получения остатка от вычитания квадрата 18 дес. из 3'57'82, достаточно к 33 приписать справа цифры 82. Далее поступаем так, как мы поступали при нахождении $\sqrt{4082}$, а именно. налево от остатка 3382 проводим вертикальную черту и за нею пишем (отступив от черты на одно место) удвоенное число найденных десятков корня, т. е. 36 (дважды 18). В остатке отделяем одну цифру справа и делим число десятков остатка, т. е. 338, на 36. В частном получаем 9. Эту цифру испытываем, для чего ее приписываем к 36 справа и на нее же умножаем. Произведение оказалось 3321, что меньше остатка. Значит, цифра 9 годится, пишем ее в корне.

Вообще, чтобы извлечь квадратный корень из какого угодно целого числа, надо сначала извлечь корень из числа его сотен; если это число более 100, то придется искать корень из числа сотен этих сотен, т. е. из десятков тысяч данного числа; если и это число более 100, придется извлекать корень из числа сотен десятков тысяч, т. е. из миллионов данного числа, и т. д.

Примеры.

1) $$\begin{array}{r|l}
\multicolumn{2}{l}{\sqrt{8'72'00'00}=2952} \\
 & 4 \\
\hline
49 & 47'2 \\
9 & 44\,1 \\
\hline
585 & 310'0 \\
5 & 292\,5 \\
\hline
5902 & 1750'0 \\
2 & 1180\,4 \\
\hline
 & 569\,6
\end{array}$$

2) $$\begin{array}{r|l}
\multicolumn{2}{l}{\sqrt{3'50'32'60'89}=18\,717} \\
 & 1 \\
\hline
28 & 25'0 \\
8 & 22\,4 \\
\hline
367 & 263'2 \\
7 & 256\,9 \\
\hline
3741 & 636'0 \\
1 & 374\,1 \\
\hline
37\,427 & 261\,98'9 \\
7 & 261\,98\,9 \\
\hline
 & 0
\end{array}$$

3) $$\begin{array}{r|l}
\multicolumn{2}{l}{\sqrt{9'51'10'56}=3084}\\
\multicolumn{2}{l}{\quad 9}\\
\hline
608 & 511'0\\
8 & 486\,4\\
\hline
6164 & 2465'6\\
4 & 2465\,6\\
\hline
 & 0
\end{array}$$

В последнем примере, найдя первую цифру и вычтя квадрат ее, получаем в остатке 0. Сносим следующие 2 цифры 51. Отделив десятки, мы получаем 5 дес., тогда как удвоенная найденная цифра корня есть 6. Значит, от деления 5 на 6 мы получаем 0. Ставим в корне 0 на втором месте и к остатку сносим следующие 2 цифры; получаем 5110. Далее продолжаем как обыкновенно.

4) $$\begin{array}{l}
\sqrt{81'00'00}=900\\
81\\
\hline
0
\end{array}$$

В этом примере искомый корень состоит только из 9 сотен, и потому на месте десятков и на месте единиц надо поставить нули.

Правило. *Чтобы извлечь квадратный корень из данного целого числа, разбивают его, от правой руки к левой, на грани, по 2 цифры в каждой, кроме последней, в которой может быть и одна цифра. Чтобы найти первую цифру корня, извлекают квадратный корень из первой грани. Чтоды найти вторую цифру, из первой грани вычитают квадрат первой цифры корня, к остатку сносят вторую грань и число десятков получившегося числа делят на удвоенную первую цифру корня; полученное целое число подвергают испытанию. Испытание это производится так: за вертикальной чертой (налево от остатка) пишут удвоенное ранее найденное число корня и к нему, с правой стороны, приписывают испытуемую цифру; получившееся после этой приписки число умножают на испытуемую цифру. Если после умножения получится число, большее остатка, то испытуемая цифра не годится и надо испытать следующую меньшую цифру. Следующие цифры корня находятся по тому же приему.*

Если после снесения грани число десятков получившегося числа окажется меньше делителя, т. е. меньше удвоенной найденной *части корня, то в корне ставят 0, сносят следующую грань и продолжают действие дальше.*

173. Число цифр корня. Из рассмотрения процесса нахождения корня следует, что *в корне столько цифр, сколько в подкоренном числе заключается граней по 2 цифры каждая (в левой грани может быть и одна цифра).*

Глава вторая.

Извлечение приближенных квадратных корней из целых и дробных чисел[1].

174. Признаки точного квадратного корня. Точным квадратным корнем из данного числа называется такое число, квадрат которого в точности равняется данному числу. Укажем некоторые признаки, по которым можно судить, извлекается ли из данного числа точный корень, или нет:

а) Если из данного целого числа не извлекается точный целый корень (получается при извлечении остаток), то из такого числа нельзя найти и дробный точный корень, так как всякая дробь, не равная целому числу, будучи умножена сама на себя, дает в произведении тоже дробь, а не целое число.

б) Так как корень из дроби равен корню из числителя, деленному на корень из знаменателя, то точный корень из несократимой дроби не может быть найден в том случае, если его нельзя извлечь из числителя или из знаменателя. Напр. из дробей $^4/_5$, $^8/_9$ и $^{11}/_{15}$ нельзя извлечь точный корень, так как в первой дроби нельзя его извлечь из знаменателя, во второй — из числителя и в третьей — ни из числителя, ни из знаменателя.

Из таких чисел, из которых нельзя извлечь точный корень, можно извлекать лишь приближенные корни.

175. Приближенный корень с точностью до 1. Приближенным квадратным корнем с точностью до 1 из данного числа (целого или дробного — все равно) называется такое целое число, которое удовлетворяет следующим двум требованиям: 1) квадрат этого числа не больше данного числа; 2) но квадрат этого числа, увеличенного на 1, больше данного числа. Другими словами, приближенным квадратным корнем с точностью до 1 называется наибольший целый квадратный корень из данного числа, т. е.

---

[1] Извлечение квадратного корня из многочленов см. в дополнениях ко 2-й части § 399 и след.

тот корень, который мы научились находить в предыдущей главе. Корень этот называется приближенным с точностью до 1, потому что для получения точного корня к этому приближенному корню надо было бы добавить еще некоторую дробь, меньшую 1, так что если вместо неизвестного точного корня мы возьмем этот приближенный, то сделаем ошибку, меньшую 1.

Положим, требуется найти приближенный квадратный корень с точностью до 1 из 395,74. Тогда, не обращая внимания на дробь, извлечем корень только из целого числа. Полученный корень 19 будет искомый, так как

$$19^2 < 395{,}74, \text{ а } 20^2 > 395{,}74.$$

$$\begin{array}{r|l} \multicolumn{2}{l}{\sqrt{3'95} = 19} \\ \multicolumn{2}{l}{\;\;1} \\ \hline 29 & 29'5 \\ 9 & 26\,1 \\ \hline & \;3\,4 \end{array}$$

Правило. *Чтобы извлечь приближенный квадратный корень с точностью до 1, надо извлечь наибольший целый корень из целой части данного числа.*

Найденное по этому правилу число есть приближенный корень с недостатком, так как в нем недостает до точного корня некоторой дроби (меньшей 1). Если этот корень увеличим на 1, то получим другое число, в котором есть некоторый избыток над точным корнем, и избыток этот меньше 1. Этот увеличенный на 1 корень можно назвать тоже приближенным корнем с точностью до 1, но с избытком[1].

176. Приближенный корень с точностью до $^1/_{10}$. Пусть требуется найти $\sqrt{2{,}35104}$ с точностью до $^1/_{10}$. Это значит, что требуется найти такую десятичную дробь, которая состояла бы из целых единиц и десятых долей и которая удовлетворяла бы двум следующим требованиям: 1) квадрат этой дроби не превосходит 2,35104, но 2) если увеличим ее на $^1/_{10}$, то квадрат этой увеличенной дроби превосходит 2,35104.

$$\begin{array}{r|l} \multicolumn{2}{l}{\sqrt{2{,}35'\,\boxed{104}} = 1{,}5} \\ \multicolumn{2}{l}{\;\;1} \\ \hline 25 & 13'5 \\ 5 & 12\,5 \\ \hline & \;1\,0 \end{array}$$

Чтобы найти такую дробь, мы сначала найдем приближенный корень с точностью до 1, т. е. извлечем корень только из целого числа 2. Получим 1 (и в остатке 1). Пишем в корне цифру 1 и ставим после нее запятую. Теперь будем искать цифру десятых. Для этого сносим к остатку 1 цифры 35, стоящие направо от запятой, и продолжаем извлечение так, как будто мы извлекали корень из целого числа 235. Полученную цифру 5 пишем в корне на месте десятых. Остальные цифры подкоренного числа (104) нам не нужны. Что полученное число 1,5 будет действительно приближенный корень с точностью до $^1/_{10}$, видно из следующего. Если бы мы находили наибольший целый корень из 235 с точностью до 1, то получили бы 15. Значит:

---

[1] Названия: „с недостатком“ или „с избытком“ в некоторых математических книгах заменены другими равносильными: „по недостатку“ или „по избытку“.

$$15^2 \leqslant 235, \text{ но } 16^2 > 235.$$

Разделив все эти числа на 100, получим:

$$\frac{15^2}{100} \leqslant 2,35; \qquad \frac{16^2}{100} > 2,35;$$

т. е.

$$\left(\frac{15}{10}\right)^2 \leqslant 2,35; \qquad \left(\frac{16}{10}\right)^2 > 2,35;$$

или

$$1,5^2 \leqslant 2,35; \qquad 1,6^2 > 2,35.$$

Значит, число 1,5 есть та десятичная дробь, которую мы назвали приближенным корнем с точностью до $^1/_{10}$.

Найдем еще этим приемом следующие приближенные корни с точностью до 0,1:

$$\begin{array}{r|l} & \sqrt{57,40}=7,5 \\ & 49 \\ \hline 145 & 84'0 \\ 5 & 725 \\ \hline & 1\,15 \end{array} \qquad \begin{array}{c} \sqrt{0,30}=0,5 \\ 25 \\ \hline 5 \end{array} \qquad \begin{array}{c} \sqrt{0,03'\boxed{8}}=0,1 \\ 1 \\ \hline 2 \end{array}$$

177. Приближенный квадратный корень с точностью до $^1/_{100}$, до $^1/_{1000}$ и т. д. Пусть требуется найти с точностью до $^1/_{100}$ приближенный $\sqrt{248}$. Это значит: найти такую десятичную дробь, которая состояла бы из целых, десятых и сотых долей и которая удовлетворяла бы двум требованиям: 1) квадрат ее не превосходит 248, но 2) если увеличим эту дробь на $^1/_{100}$, то квадрат этой увеличенной дроби превосходит 248. Такую дробь мы найдем в такой последовательности: сначала отыщем целое число, потом цифру десятых, затем и цифру сотых. Корень из целого числа будет 15 целых. Чтобы получить цифру десятых, надо, как мы видели, снести к остатку 23 еще 2 цифры, стоящие

$$\begin{array}{r|l} \multicolumn{2}{l}{\sqrt{2'48',00'00}=15{,}74} \\ & 1 \\ \hline 25 & 14'8 \\ 5 & 125 \\ \hline 307 & 23\,0'0 \\ 7 & 21\,49 \\ \hline 3\,144 & 1\,510'0 \\ 4 & 1\,257\,6 \\ \hline & 252\,4 \end{array}$$

направо от запятой. В нашем примере этих цифр нет вовсе, ставим на их место нули. Приписав их к остатку и продолжая действие так, как будто находим корень из целого числа 24 800, мы найдем цифру десятых 7. Остается найти цифру сотых. Для этого приписываем к остатку 151 еще 2 нуля и продолжаем извлечение, как будто мы находим корень из целого числа 2 480 000. Получаем 15,74. Что это число действительно есть приближенный корень из 248 с точностью до $^1/_{100}$, видно из следующего. Если бы мы находили наибольший целый квадратный корень из целого числа 2 480 000, то получили бы 1574; значит:

$$1574^2 \leqslant 2\,480\,000, \text{ но } 1575^2 > 2\,480\,000.$$

Разделив все числа на 10 000 ($=100^2$), получим:

$$\frac{1574^2}{100^2} \leqslant 248{,}0000; \qquad \frac{1575^2}{100^2} > 248{,}0000,$$

т.е.

$$\left(\frac{1574}{100}\right)^2 \leqslant 248{,}0000; \qquad \left(\frac{1575}{100}\right)^2 > 248{,}0000,$$

или

$$15{,}74^2 \leqslant 248; \qquad 15{,}75^2 > 248.$$

Значит, 15,74 есть та десятичная дробь, которую мы назвали приближенным корнем с точностью до $^1/_{100}$ из 248.

Применяя этот прием к нахождению приближенного корня с точностью до $^1/_{1000}$, до $^1/_{10000}$ и т. д., найдем следующее.

Правило. *Чтобы извлечь из данного целого числа или из данной десятичной дроби приближенный корень с точностью до $^1/_{10}$, до $^1/_{100}$, до $^1/_{1000}$ и т. д., находят сначала приближенный корень с точностью до 1, извлекая корень из целого числа (если его нет, пишут в корне 0 целых).*

Потом находят цифру десятых. Для этого к остатку сносят 2 цифры подкоренного числа, стоящие направо от запятой (если их нет, приписывают к остатку два нуля), и продолжают извлечение так, как это делается при извлечении корня из целого числа. Полученную цифру пишут в корне на месте десятых.

Затем находят цифру сотых. Для этого к остатку сносят снова две цифры, стоящие направо от тех, которые были только что снесены, и т. д.

Таким образом, при извлечении корня из целого числа с десятичной дробью, надо *делить на грани по 2 цифры в каждой, начиная от запятой, как влево* (в целой части числа), *так и вправо* (в дробной части).

Примеры.

1) Найти до $^1/_{100}$ корни: а) $\sqrt{2}$; б) $\sqrt{0{,}3}$;

а) $\sqrt{2}=1{,}41$

$$\begin{array}{r|l} \multicolumn{2}{r}{1} \\ \hline 24 & 10'0 \\ 4 & 9\,6 \\ \hline 281 & 10'0 \\ 1 & 28\,1 \\ \hline & 11\,9 \end{array}$$

б) $\sqrt{0{,}30}=0{,}54$

$$\begin{array}{r|l} \multicolumn{2}{r}{25} \\ \hline 104 & 50'0 \\ 4 & 41\,6 \\ \hline & 8\,4 \end{array}$$

2) Извлечь до $^1/_{10000}$: а) $\sqrt{0{,}38472}$; б) $\sqrt{^3/_7}$

а) $\sqrt{0{,}38'47'20}=0{,}6202$;

$$\begin{array}{r|l} \multicolumn{2}{r}{36} \\ \hline 122 & 24'7 \\ 2 & 24\,4 \\ \hline 12402 & 32'00'0 \\ 2 & 24\,80\,4 \\ \hline & 7\,19\,6 \end{array}$$

б) $\sqrt{^3/_7}=\sqrt{0{,}42'85'71'42}$

$\sqrt{0{,}42'85'71'42}=0{,}6516$

$$\begin{array}{r|l} \multicolumn{2}{r}{36} \\ \hline 125 & 68'5 \\ 5 & 62\,5 \\ \hline 1304 & 6\,07'1 \\ 4 & 5\,21\,6 \\ \hline 13086 & 8\,554'2 \\ 6 & 7\,851\,6 \\ \hline & 702\,6 \end{array}$$

В последнем примере мы обратили дробь $^3/_7$ в десятичную, вычислив 8 десятичных знаков, чтобы образовались 4 грани, потребные для нахождения 4 десятичных знаков корня.

178. Описание таблицы квадратных корней. В конце этой книги приложена таблица квадратных корней, вычисленных с четырьмя цифрами. По этой таблице можно быстро находить квадратный корень из целого числа (или десятичной дроби), которое выражено не более, чем четырьмя цифрами. Прежде чем объяснить, как эта таблица устроена, заметим, что первую значащую цифру искомого корня мы всегда можем найти без помощи таблиц по одному взгляду на подкоренное число; мы легко также определим, какой десятичный разряд означает первая цифра корня и, следовательно, где в корне, когда найдем его цифры, надо поставить запятую. Приведем несколько примеров:

1) $\sqrt{5'27{,}3}$. Первая цифра будет 2, так как левая грань подкоренного числа есть 5, а корень из 5 равен 2. Кроме того, так как в целой части подкоренного числа всех граней только 2, то в целой части искомого корня должно быть 2 цифры и, следовательно, первая его цифра 2 должна означать десятки.

2) $\sqrt{9{,}011}$. Очевидно, в этом корне первая цифра будет 3 простые единицы.

3) $\sqrt{0{,}00'83'4}$. Первая значащая цифра есть 9, так как грань, из которой пришлось бы извлекать корень для получения первой значащей цифры, есть 83, а корень из 83 равен 9. Так как в искомом числе не будет ни целых, ни десятых, то первая цифра 9 должна означать сотые.

4) $\sqrt{0{,}73'85}$. Первая значащая цифра есть 8 десятых.

5) $\sqrt{0{,}00'00'35'7}$. Первая значащая цифра будет 5 тысячных.

Сделаем еще одно замечание. Положим, что требуется извлечь корень из такого числа, которое, после отбрасывания в нем запятой, изображается рядом таких цифр: 5681. Корень этот может быть один из следующих:

$$\sqrt{\underline{5681}};\ \sqrt{\underline{\underline{568{,}1}}};\ \sqrt{\underline{56{,}81}};\ \sqrt{\underline{\underline{5{,}681}}};\ \sqrt{\underline{0{,}5681}};\ \sqrt{\underline{\underline{0{,}05681}}};\ \text{и т. д.}$$

Если возьмем корни, подчеркнутые нами одной чертою, то все они будут выражены одним и тем же рядом цифр, именно теми цифрами, которые получаются при извлечении корня из 5681 (это будут цифры 7, 5, 3, 7). Причина этому та, что грани, на которые приходится разбивать подкоренное число при нахождении цифр корня, будут во всех этих примерах одни и те же, поэтому и цифры для каждого корня окажутся одинаковые (только положение запятой будет, конечно, различное). Точно так же во всех корнях, подчеркнутых нами двумя чертами, должны получиться одинаковые цифры, именно те, которыми выражается $\sqrt{568{,}1}$ (эти цифры будут 2, 3, 8, 3), и по той же причине. Таким образом, цифры корней из чисел, изображаемых (по отбрасывании запятой) одним и тем же рядом цифр 5681, будут двоякого (и только двоякого) рода: либо это ряд 7, 5, 3, 7, либо ряд 2, 3, 8, 3. То же самое, очевидно, может быть сказано о всяком другом ряде цифр. Поэтому, как мы сейчас увидим, в таблице каждому ряду цифр подкоренного числа соответствуют 2 ряда цифр для корней.

Теперь мы можем объяснить устройство таблицы и способ ее пользования. Для ясности объяснения мы изобразили здесь начало первой страницы таблицы:

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1 2 3	4 5 6	7 8 9
10	1000 3162	1005 3178	1010 3194	015 3209	1020 3225	1025 240	1030 3256	1034 3271	1039 3286	1044 3302	0 1 1 2 3 5	2 2 3 6 8 9	3 4 4 11 12 13
11	1049 331	1054 333	1058 34	1063 3362	1068 3376	1072 3391	1077 3406	1082 3421	086 3435	1091 3450	0 1 1 1 3 4	2 2 3 6 7 9	3 4 4 10 12 13

Таблица эта расположена на нескольких страницах. На каждой из них в первой слева колонке помещены числа 10, 11, 12... (до 99). Эти числа выражают первые 2 цифры числа, из которого ищется квадратный корень. В верхней горизонтальной строчке (а также и в нижней) размещены числа: 0, 1, 2, 3... 9, представляющие собою 3-ю цифру данного числа, а затем далее направо помещены цифры 1, 2, 3.... 9, представляющие собою 4-ю цифру данного числа. Во всех других горизонтальных строчках помещены по 2 четырехзначных числа, выражающие квадратные корни из соответствующих чисел.

Пусть требуется найти квадратный корень из какого-нибудь числа, целого или выраженного десятичною дробью. Прежде всего находим без помощи таблиц первую цифру корня и ее разряд. Затем отбросим в данном числе запятую, если она есть. Положим сначала, что после отбрасывания запятой останутся только 3 цифры, напр. 114. Находим в таблицах в левой крайней колонке первые 2 цифры, т. е. 11, и продвигаемся от них направо по горизонтальной строке до тех пор, пока не дойдем до вертикальной колонки, наверху (и внизу) которой стоит 3-я цифра числа, т. е. 4. В этом месте мы находим два четырехзначных числа: 1068 и 3376. Которое из этих двух чисел надо взять и где поставить в нем запятую, это определяется первою цифрою корня и ее разрядом, которые мы нашли раньше. Так, если надо найти $\sqrt{0,114}$, то первая цифра корня есть 3 десятых, и потому мы должны взять для корня 0,3376. Если бы требовалось найти $\sqrt{1,14}$, то первая цифра корня была бы 1, и мы взяли бы тогда 1,068.

Таким образом мы легко найдем:

$\sqrt{5{,}30}=2{,}302$; $\sqrt{7'18}=26{,}80$; $\sqrt{0{,}91'6}=0{,}9571$ и т. п.

Положим теперь, что требуется найти корень из числа, выраженного (по отбрасывании запятой) 4 цифрами, напр. $\sqrt{7'45{,}6}$. Заметив, что первая цифра корня есть 2 десятка, находим для числа 745 так, как сейчас было объяснено, цифры 2729 (это число только замечаем пальцем, но его не записываем). Потом продвигаемся от этого числа еще направо до тех пор, пока в правой части таблицы (за последнею жирною чертою) не встретим ту вертикальную колонку, которая отмечена наверху (и внизу) 4-й цифрой данного числа, т. е. цифрой 6, и находим там число 1. Это будет **поправка**, которую надо приложить (в уме) к ранее найденному числу 2729; получим 2730. Это число записываем и ставим в нем запятую на надлежащем месте: 27,30.

Таким путем найдем, напр:

$\sqrt{44{,}37}=6{,}661$; $\sqrt{4{,}437}=2{,}107$; $\sqrt{0{,}04'437}=0{,}2107$ и т. д.

Если подкоренное число выражается только одной или двумя цифрами, то мы можем предположить, что после этих цифр стоит один или два нуля, и затем поступать так, как было объяснено для трехзначного числа. Напр. $\sqrt{2{,}7}=\sqrt{2{,}70}=1{,}643$; $\sqrt{0{,}13}=\sqrt{0{,}13'0}=0{,}3606$ и т. п.

Наконец, если подкоренное число выражено более, чем 4 цифрами, то из них мы возьмем только первые 4, а остальные отбросим, причем для уменьшения ошибки, если первая из отбрасываемых цифр есть 5 или более 5, то мы увеличим на 1 четвертую из удержанных цифр. Так:

$\sqrt{357{,}8\boxed{3}}=18{,}91$; $\sqrt{0{,}49'35\boxed{7}}=0{,}7025$; и т. п.

Замечание. В таблицах указан приближенный квадратный корень иногда с недостатком, иногда же с избытком, а именно тот из этих приближенных корней, который ближе подходит к точному корню.

179. Извлечение квадратных корней из обыкновенных дробей. Точный квадратный корень из несократимой дроби можно извлечь лишь тогда, когда оба члена дроби точные квадраты (§ 174). В этом случае достаточно извлечь корень из числителя и знаменателя отдельно, напр.:

$$\sqrt{\frac{9}{16}}=\frac{\sqrt{9}}{\sqrt{16}}=\frac{3}{4}.$$

Приближенный квадратный корень из обыкновенной дроби с какою-нибудь десятичною точностью проще всего можно находить, если предварительно обратим обыкновенную дробь в десятичную, вычислив в этой дроби такое число десятичных знаков после запятой, которое было бы *вдвое больше* числа десятичных знаков в искомом корне. Пусть, напр., надо найти $\sqrt{2^3/_7}$ с точностью до 0,01, т. е. с 2 десятичными знаками после запятой. Для этого обратим $2^3/_7$ в десятичную дробь с 4 десятичными знаками: $2^3/_7 = 2,4285\ldots$ и извлечем приближенный корень из 2,4285 с точностью до 0,01.

$$\sqrt{2,4285} = 1,55$$

$$\begin{array}{r|r} & 1 \\ \hline 25 & 14'2 \\ 5 & 12\,5 \\ \hline 305 & 178'5 \\ 5 & 152\,5 \\ \hline & 260 \end{array}$$

Впрочем можно поступать и иначе. Объясним это на следующем примере:

Найти приближенный $\sqrt{^5/_{24}}$.

Сделаем знаменатель точным квадратом. Для этого достаточно было бы умножить оба члена дроби на знаменатель 24; но в этом примере можно поступить иначе. Разложим 24 на простые множители: $24 = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3$. Из этого разложения видно, что если 24 умножить на 2 и еще на 3, то тогда в произведении каждый простой множитель будет повторяться четное число раз, и, следовательно знаменатель сделается квадратом:

$$\sqrt{\frac{5}{24}} = \sqrt{\frac{5}{2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3}} = \sqrt{\frac{5 \cdot 2 \cdot 3}{2^4 \cdot 3^2}} = \frac{\sqrt{30}}{2^2 \cdot 3} = \frac{\sqrt{30}}{12}.$$

Остается вычислить $\sqrt{30}$ с какой-нибудь точностью и результат разделить на 12. При этом надо иметь в виду, что от деления на 12 уменьшится и дробь, показывающая степень точности. Так, если найдем $\sqrt{30}$ с точностью до $^1/_{10}$ и результат разделим на 12, то получим приближенный корень из дроби $^5/_{24}$ с точностью до $^1/_{120}$ (а именно $^{54}/_{120}$ и $^{55}/_{120}$).

Глава третья.

График функции $x = \sqrt{y}$.

180. Обратная функция. Пусть дано какое-нибудь уравнение, определяющее y как функцию от x, напр. такое: $y = x^2$. Мы можем сказать, что оно определяет не только y как функцию от x, но и, обратно, определяет x как функцию от y, хотя и неявным образом. Чтобы сделать эту функцию явной, надо решить данное уравнение относительно x, принимая y за известное число; так, из взятого нами уравнения находим: $x=\sqrt{y}$. *Алгебраическое выражение, полученное для x после решения уравнения, определяющего y как функцию от x, называется функцией, обратной той, которая определяет y.* Значит, функция $x=\sqrt{y}$ обратна функции $y=x^2$. Если, как это принято, независимое переменное обозначим x, а зависимое y, то полученную сейчас обратную функцию можем выразить так: $y=\sqrt{x}$. Таким образом, чтобы получить функцию, обратную данной (прямой), надо из уравнения, определяющего эту данную функцию, вывести x в зависимости от y и в полученном выражении заменить y на x, а x на y.

181. График функции $y=\sqrt{x}$. Функция эта невозможна при отрицательном значении x, но ее возможно вычислить (с любою точностью) при всяком положительном значении x, причем для каждого такого значения функция получает два различных значения с одинаковой абсолютной величиной, но с противоположными знаками. Если знаком $\sqrt{\ }$ будем обозначать только арифметическое значение квадратного корня, то эти два значения функции можем выразить так: $y=\pm\sqrt{x}$. Для построения графика этой функции надо предварительно составить таблицу ее значений. Всего проще эту таблицу составить из таблицы значений прямой функции:

$$y=x^2.$$

x	0	$^1/_2$	1	$1^1/_2$	2	$2^1/_2$	...	$-^1/_2$	-1	$-1^1/_2$	-2	$-2^1/_2$
y	0	$^1/_4$	1	$2^1/_4$	4	$6^1/_4$	...	$^1/_4$	1	$2^1/_4$	4	$6^1/_4$

если значения y примем за значения x, и наоборот:

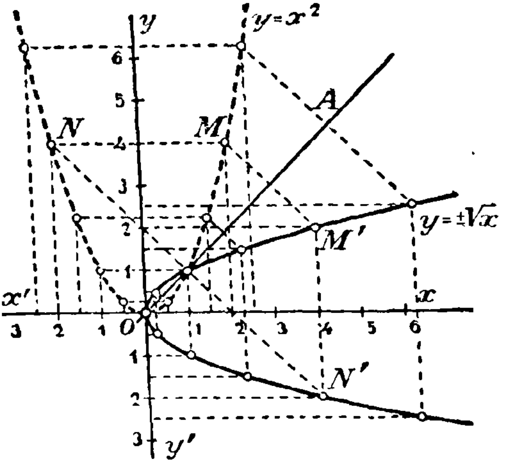
$$y=\pm\sqrt{x}.$$

x	0	$^1/_4$	1	$2^1/_4$	4	$6^1/_4$	...
y	0	$\pm^1/_2$	$+1$	$\pm1^1/_2$	±2	$\pm2^1/_2$	...

Нанеся все эти значения на чертеже, получим следующий график (черт. 44).

На том же чертеже мы изобразили (прерывистой линией) и график прямой функции $y = x^2$. Сравним эти два графика между собою.

182. Соотношение между графиками прямой и обратной функций. Для составления таблицы значений обратной функции $y = \pm\sqrt{x}$ мы брали для x те числа, которые в таблице прямой функции $y = x^2$ служили значениями для y, а для y брали те числа, которые в этой таблице были значениями для x. Из этого следует, что оба графика одинаковы, только график прямой функции так расположен относительно оси y-ов, как график обратной функции расположен относительно оси x-ов. Вследствие этого, если мы перегнем чертеж вокруг прямой OA, делящей пополам прямой угол xOy, так, чтобы часть чертежа, содержащая полуось Oy, упала на ту часть, которая содержит полуось Ox, то Oy совместится с Ox, все деления Oy совпадут с делениями Ox, и точки параболы $y = x^2$ совместятся с соответствующими точками графика $y = \pm\sqrt{x}$. Напр. точки M и N, у которых ордината 4, а абсциссы 2 и —2, совпадут с точками M' и N', у которых абсцисса 4, а ординаты 2 и —2. Если же эти точки совпадут, то это значит, что прямые MM' и NN' перпендикулярны к OA и делятся этою прямою пополам. То же самое можно сказать о всех других соответствующих точках обоих графиков.



Черт. 44.

Таким образом, график обратной функции должен быть такой же, как и график прямой функции, но расположены эти графики различно, а именно симметрично друг с другом относительно биссектрисы угла xOy. Можно сказать, что график обратной функции есть отображение (как в зеркале) графика прямой функции относительно биссектрисы угла xOy.

ОТДЕЛ ВОСЬМОЙ.

ДЕЙСТВИЯ НАД ИРРАЦИОНАЛЬНЫМИ ЧИСЛАМИ И ВЫРАЖЕНИЯМИ.

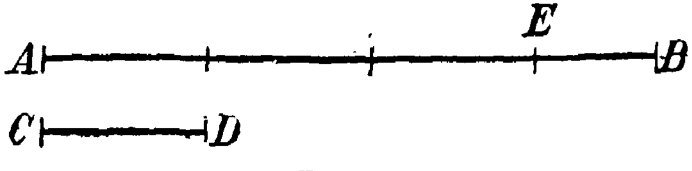
Глава первая.

Понятие об иррациональном числе.

183. **Соизмеримые и несоизмеримые с *единицею* значения величины.** Как известно из геометрии, общею мерою двух отрезков прямой, или двух углов, или двух дуг одинакового радиуса, вообще двух значений одной и той же величины, называется такое значение этой величины, которое в *каждом из них* содержится целое число раз без остатка. В геометрии же разъясняется, что могут быть такие два отрезка, которые не имеют общей меры (*напр. сторона квадрата* и его диагональ).

Два значения одной и той же величины называются соизмеримыми или несоизмеримыми между собою, смотря по тому, имеют ли они общую меру, или не имеют.

184. **Понятие об измерении.** *Пусть требуется* измерить длину отрезка AB (черт. 45) при помощи единицы длины CD. Для этого



Черт. 45.

узнаем, сколько раз единица CD содержится в AB. Пусть окажется, что она содержится в AB 3 раза с некоторым остатком EB, меньшим CD. Тогда число 3 будет приближенный результат измерения с точностью до 1 и притом с недостатком, так как

AB больше $3CD$, но меньше $4CD$ (число 4 тоже можно назвать приближенным результатом измерения с точностью до 1, но с избытком). Желая получить более точный результат измерения, узнаем, сколько раз в остатке EB содержится какая-нибудь доля единицы CD, напр. $^1/_{10}$ CD. Положим, что эта доля содержится в EB более 8, но менее 9 раз. Тогда числа 3,8 и 3,9 будут приближенные результаты измерения отрезка AB с точностью до $^1/_{10}$, первое число с недостатком, второе с избытком. Желая получить еще более точный результат измерения, узнаем, сколько раз в последнем остатке содержится $^1/_{100}$ доля единицы CD. Положим, что эта доля содержится в остатке более 5 раз, но менее 6 раз. Тогда числа 3,85 и 3,86 будут приближенные результаты измерения отрезка AB с точностью до $^1/_{100}$ единицы. Можно продолжать такое измерение все далее и далее до тех пор, пока или не окажется никакого остатка, или остаток сделается столь малым, что им можно пренебречь; в первом случае мы получим точный результат измерения, во втором случае — приближенный с точностью до той доли единицы, посредством которой измеряли в последний раз.

Если отрезок AB несоизмерим с единицею длины CD, то точного результата измерения мы никогда получить не можем. Действительно, если допустим, что таким результатом была бы какая-нибудь дробь, напр. $^{59}/_{27}$, то тогда $^1/_{27}$ доля CD служила бы общею мерою для AB и CD, а несоизмеримые отрезки общей меры не имеют. Если же отрезок AB соизмерим с CD, то мы могли бы получить точный результат измерения, если бы предварительно нашли общую меру для AB и CD и узнали, сколько раз она содержится в AB и CD. Если, положим, общая мера в AB содержится 23 раза, а в CD 11 раз, то $AB = {}^{23}/_{11}$ единицы CD. Но если, не отыскивая общей меры, мы производим измерение произвольно взятыми долями единицы, то и в этом случае можем часто не получить точного результата измерения.

Измерение чаще всего производится посредством десятичных долей единицы; тогда результат измерения выражается десятичною дробью. Когда измеряемый отрезок соизмерим с единицею длины, то десятичная дробь может получиться или конечная (если общею мерою служит какая-нибудь десятичная доля единицы), или бесконечная (когда общая мера есть такая доля единицы, которая не обращается в точную десятичную дробь). Если же измеряемый отрезок несоизмерим с единицею длины, то точного результата измерения быть не может, и потому десятичная дробь должна оказаться бесконечной (если измерение продолжается все дальше и дальше без конца).

Полезно заметить, что есть существенная разница между той бесконечной десятичной дробью, которая может получиться от измерения соизмеримого отрезка, и тою, которая происходит от измерения несоизмеримого отрезка. Первая дробь должна быть периодической, вторая непериодической[1]).

185. Иррациональные числа. Числа целые, дробные, десятичные конечные и десятичные периодические носят общее название рациональных чисел; десятичные бесконечные дроби непериодические называются иррациональными числами[2]). Первые служат мерою величин, соизмеримых с единицею, вторые — мерою величин, несоизмеримых с единицею.

Иррациональное число считается известным (или данным), если указан способ, посредством которого можно находить любое число его десятичных знаков.

Два иррациональных числа (как и два рациональных) считаются равными, если они произошли от измерения одною и тою же единицею двух равных величин; из двух неравных чисел то считается большим, которое произошло от измерения большей величины. Две равные величины, конечно, должны содержать в себе одинаковое число целых единиц, одинаковое число десятых долей, одинаковое число сотых долей и т. п., поэтому равные иррациональные числа должны быть выражены одинаковыми цифрами[3]). Большая же величина должна содержать в себе большее число целых или — при равенстве целых — большее число десятых, или — при равенстве целых и десятых — большее число, сотых и т. д. Напр., число 2,745037... больше числа 2,745029..., так как в первом 6-я цифра выражает число большее, чем 6-я цифра во втором, при тождественности всех предыдущих цифр.

---

[1]) Действительно, в случае соизмеримости, мы всегда могли бы получить точный результат измерения в виде обыкновенной дроби. Обратив эту обыкновенную дробь в десятичную, мы выразили бы результат измерения в виде десятичной дроби. Но обыкновенная дробь, обращаясь в бесконечную десятичную, даст всегда периодическую дробь. В случае же несоизмеримости измеряемого отрезка, бесконечная десятичная дробь не может оказаться периодическою, так как, если бы она была такою, то ее можно было бы обратить в обыкновенную, и тогда эта обыкновенная дробь была бы точным результатом измерения, а такого результата не может быть в случае несоизмеримости. Значит, в этом случае бесконечная десятичная дробь должна быть непериодической.

[2]) Латинское слово *ratio* означает отношение. Рациональные числа те, которых отношение к 1 выражается точно, иррациональные те, которых отношение к 1 не может быть выражено точно.

[3]) Два равных рациональных числа могут иногда выражаться неодинаковыми цифрами, именно тогда, когда одно из них есть периодическая дробь с периодом 9. Так, 0,999... = 1, или 2,3999... = 2,4.

Иррациональные числа могут быть положительными и отрицательными, смотря по тому, измеряют ли они величины, считаемые положительными, или величины, считаемые отрицательными.

186. Приближенные значения иррационального числа. Пусть нам дано какое-нибудь иррациональное число α [1], т. е. пусть указан способ, посредством которого мы можем получить сколько угодно цифр числа α (этим способом может быть, напр., то правило, посредством которого мы находим приближенные квадратные корни с точностью до $^1/_{10}$, до $^1/_{100}$, до $^1/_{1000}$ и т. д.). Положим, мы нашли такие 5 цифр числа α:

$$\alpha = 1{,}4142\ldots$$

Возьмем из этих цифр несколько первых, напр. цифры 1,41, а остальные отбросим. Тогда мы получим *приближенное значение* числа α, причем это значение будет *с недостатком*, так как $1{,}41 < \alpha$. Если последнюю из удержанных нами цифр увеличим на 1, т. е. вместо 1,41 возьмем 1,42, то получим тоже приближенное значение числа α, но *с избытком*. Обыкновенно из двух приближенных значений, из которых одно с недостатком, другое с избытком, берут значение с недостатком, если первая из отброшенных цифр менее 5, и значение с избытком, если эта цифра больше 5.

187. Определение действий над иррациональными числами. Пусть α и β будут какие-нибудь данные *положительные* иррациональные числа. Если эти числа даны, то это значит, что мы можем найти их приближенные значения с любою точностью. Пусть, напр., приближенные значения чисел α и β, взятые с недостатком, будут такие (мы берем приближенные значения $\sqrt{3}$ и $\sqrt{2}$):

	до 0,1	до 0,01	до 0,001	до 0,0001
для числа α	1,7	1,73	1,732	1,7320
для числа β	1,4	1,41	1,414	1,4142

---

[1] В математике иногда употребляются буквы греческого алфавита, чаще всего следующие: α (альфа), β (бэта), γ (гамма), δ (дельта), ε (эпсилон), θ (тэта), π (пи), ρ (ро), φ (фи), ω (омега).

(Соответствующие приближенные значения с избытком получаются из этих чисел посредством усиления последнего десятичного знака на 1.)

Тогда: а) сложить α и β значит найти число, которое было бы

больше каждой из сумм:	и меньше каждой из сумм:
$1{,}7+1{,}4 \ldots\ldots = 3{,}1$	$1{,}8+1{,}5 \ldots\ldots = 3{,}3$
$1{,}73+1{,}41 \ldots\ldots = 3{,}14$	$1{,}74+1{,}42 \ldots\ldots = 3{,}16$
$1{,}732+1{,}414 \ldots = 3{,}146$	$1{,}733+1{,}415 \ldots\ldots = 3{,}148$
$1{,}7320+1{,}4142 \ldots = 3{,}1462$	$1{,}7321+1{,}4143 \ldots = 3{,}1464$

т. е. *сложить числа α и β — значит найти такое третье число, которое было бы больше суммы любых приближенных их значений, взятых с недостатком, но меньше суммы любых приближенных значений, взятых с избытком.*

б) Беря приближенные значения чисел α и β, указанные сейчас, мы можем сказать, что произведение $\alpha\beta$ есть число, которое

больше каждого из произв.:	и меньше каждого из произв.:
$1{,}7 \cdot 1{,}4 \ldots\ldots = 2{,}38$	$1{,}8 \cdot 1{,}5 \ldots\ldots = 2{,}70$
$1{,}73 \cdot 1{,}41 \ldots = 2{,}4393$	$1{,}74 \cdot 1{,}42 \ldots = 2{,}4708$
$1{,}732 \cdot 1{,}414 \ldots = 2{,}449048$	$1{,}733 \cdot 1{,}415 \ldots = 2{,}452195$
$1{,}7320 \cdot 1{,}4142 \ldots = 2{,}44939440$	$1{,}7321 \cdot 1{,}4143 \ldots = 2{,}44970903$

т. е. *перемножить числа α и β — значит найти такое третье число, которое было бы больше произведения их любых приближенных значений, взятых с недостатком, но меньше произведения их любых приближенных значений, взятых с избытком.*

в) *Возвысить иррациональное число α во вторую, третью, четвертую и т. д. степени — значит найти произведение, составленное из двух, трех, четырех и т. д. сомножителей, равных α.*

г) Обратные действия определяются для иррациональных чисел так же, как и для рациональных; так, вычесть из числа α число β значит найти такое число x, чтобы сумма $\beta+x$ равнялась α, и т. п.

Если одно из чисел α или β будет рациональное, то в указанных определениях прямых действий вместо приближенных значений такого числа можно брать точное число.

Произведение иррационального числа на нуль принимается, как и для чисел рациональных, равным нулю.

Действия над отрицательными иррациональными числами производятся согласно правилам, данным для рациональных отрицательных чисел.

При более обстоятельном рассмотрении можно установить, что *действия над иррациональными числами обладают теми же* *свойствами, какие принадлежат действиям над числами рациональными;* напр., сумма и произведение обладают свойствами переместительным и сочетательным; произведение и деление, кроме того, обладают еще распределительным свойством. Свойства, выражаемые неравенствами, также сохраняются у чисел иррациональных; так, если $\alpha > \beta$, то $\alpha + \gamma > \beta + \gamma$, $\alpha\gamma > \beta\gamma$ (если $\gamma > 0$) и $\alpha\gamma < \beta\gamma$ (если $\gamma < 0$), и т. п.

Глава вторая.

Иррациональные значения радикалов.

188. Приближенные корни любой степени. Мы уже говорили (§§ 175—177), что такое приближенные квадратные корни с точностью до 1, до $^1/_{10}$ и т. д. и как эти корни находятся. Сказанное тогда о квадратном корне может быть применено к корню всякой другой степени. Напр., приближенным $\sqrt[3]{2}$ с точностью до $^1/_{100}$ называется такая десятичная дробь, состоящая из целых, десятых и сотых, куб которой меньше 2, но если увеличим ее на $^1/_{100}$ и эту увеличенную дробь возвысим в куб, то получим больше 2.

Мы не будем выводить правил для нахождения точных и приближенных корней кубичных и других более высоких степеней; ограничимся только указанием следующего простого приема для нахождения таких корней. Пусть требуется найти $\sqrt[3]{2}$. Приближенные корни с точностью до 1 будут, очевидно, числа 1 (с недостатком) и 2 (с избытком). Чтобы найти цифру десятых долей искомого корня, найдем в ряду:

$$1;\ 1{,}1;\ 1{,}2;\ 1{,}3;\ 1{,}4;\ 1{,}5;\ 1{,}6;\ 1{,}7;\ 1{,}8;\ 1{,}9;\ 2$$

два рядом стоящих числа таких, чтобы куб левого числа был меньше 2, а куб правого больше 2. Для этого возьмем из чисел нашего ряда среднее 1,5 и возвысим его в куб. Мы найдем: $1{,}5^3 = 3{,}375$, что больше 2. Так как числа, стоящие направо от 1,5 дают при возвышении в куб еще больше, то мы можем отбросить всю правую половину ряда и испытать только числа:

$$1;\ 1{,}1;\ 1{,}2;\ 1{,}3;\ 1{,}4.$$

Возьмем среднее из них 1,2 и возвысим в куб. Получим 1,728, что меньше 2. Значит, испытанию подлежат теперь только числа 1,3 и 1,4. Возвысив в куб число 1,3, получим 2,197, что больше 2. Мы получили таким образом два числа

1,2 и 1,3, которые разнятся между собою на 0,1 и между кубами которых заключается число 2. Это и будут приближенные кубичные корни из 2 с точностью до $^1/_{10}$ с недостатком и с избытком. Если желаем найти цифру сотых, мы должны испытать следующие числа:

$$1{,}21;\ 1{,}22;\ 1{,}23;\ \ldots\ldots\ 1{,}29.$$

Взяв в этом ряду среднее число 1,25 и возвысив его в куб, найдем: $1{,}25^3 = 1{,}953125$, что меньше 2. Значит, теперь надо испытать только числа: 1,26; 1,27; 1,28; 1,29. Так как $1{,}25^3$ очень мало разнится от 2, то весьма вероятно, что $1{,}26^3$ будет больше 2. И действительно, возвысив 1,26 в куб, получим 2,000376. Значит, искомый кубичный корень из 2 с точностью до $^1/_{100}$ будет 1,25 (с недостатком) или 1,26 (с избытком). Если бы мы желали далее найти цифры тысячных, то должны были бы подобным же путем испытать числа ряда:

$$1{,}251;\ 1{,}252;\ 1{,}253;\ \ldots\ldots\ldots\ 1{,}259.$$

Конечно, прием этот утомителен (существуют более удобные способы)[1], но из него ясно видно, что десятичные цифры приближенных корней любой степени могут быть найдены в каком угодно большом числе.

189. Иррациональное значение корня. Разъясним, что $\sqrt{3}$, который точно не выражается ни целым, ни дробным числом, равен некоторому иррациональному числу. Для этого вычислим ряд приближенных $\sqrt{3}$ с точностью до $^1/_{10}$, до $^1/_{100}$, до $^1/_{1000}$...

Эти значения будут:

$$\sqrt{3} = 1{,}7320\ldots$$

1,7; 1,73; 1,732; 1,7320 (с нед.).

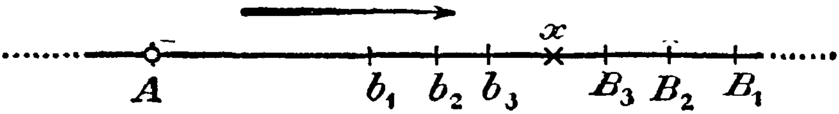
1,8; 1,74; 1,733; 1,7321 (с изб.).

$$\begin{array}{r|l} & 1 \\ \hline 27 & 20'0 \\ 7 & 189 \\ \hline 343 & 110'0 \\ 3 & 1029 \\ \hline 3462 & 710'0 \\ 2 & 6924 \\ \hline 34640 & 1760'0 \end{array}$$

Изобразим все эти числа на числовой прямой. Для этого примем какую-нибудь точку A некоторой прямой (черт. 46) за начало отрезков и, выбрав произвольную единицу длины, отложим на прямой отрезки: $Ab_1 = 1{,}7$, $Ab_2 = 1{,}73$ и т. д.; затем отрезки: $AB_1 = 1{,}8$, $AB_2 = 1{,}74$ и т. д. Так как каждый приближенный корень с недостатком меньше каждого приближенного корня с избытком (потому что квадрат первого меньше 3, а квадрат второго больше 3), то каждая точка b должна лежать налево от каждой точки B. С другой стороны, разность между приближенным корнем с избытком и соответствующим приближенным корнем с недостатком может быть сделана как угодно мала; поэтому при неограниченном увеличении точности, с какою мы находим приближенные квадратные корни из 3, промежуток на числовой прямой, отделяющий область точек b от области точек B (т. е. промежуток b_1B_1, b_2B_2, $b_3B_3 \ldots$), становится все

---

[1] Корни любых степеней весьма просто вычисляются, как мы увидим позже, посредством логарифмов,



Черт. 46.

меньше и меньше и может сделаться как угодно малым. При этих условиях мы должны допустить, что на прямой существует некоторая точка x (и только одна), которая служит границею, отделяющею ту часть прямой, на которой лежат все точки b, от той ее части, на которой расположены все точки B.

Обозначим буквою a число, измеряющее отрезок Ax. Так как это число больше каждого из чисел, измеряющих отрезки Ab_1, Ab_2 . . . и меньше каждого из чисел, измеряющих отрезки AB_1, AB_2 . . ., то a^2 должно быть больше квадрата каждого из приближенных квадратных корней из 3, взятого с недостатком, и меньше квадрата каждого из приближенных квадратных корней из 3, взятого с избытком. Согласно определению приближенных квадратных корней, такое число есть 3. Значит, $a^2 = 3$ и поэтому $a = \sqrt{3}$.

Повторяя все сейчас сказанное о $\sqrt{3}$, о корне какой угодно степени из какого угодно числа (конечно, положительного, так как мы говорим об арифметических корнях), можно сказать, что, каково бы ни было число A, всегда $\sqrt[m]{A}$ есть некоторое число, рациональное или иррациональное, которого m-ая степень равна A. Поэтому все свойства радикалов, основанные на этом определении корня (§ 168), применимы также и к иррациональным их значениям. Таким образом, каковы бы ни были положительные числа, всегда будем иметь:

$$\sqrt[m]{abc} = \sqrt[m]{a}\,\sqrt[m]{b}\,\sqrt[m]{c}; \quad \sqrt[m]{a^{mn}} = a^n; \quad \sqrt[m]{\frac{a}{b}} = \frac{\sqrt[m]{a}}{\sqrt[m]{b}}.$$

Глава третья.

Понятие о приближенных вычислениях.

190. Предварительное замечание. При совершении какого-либо действия над числами иррациональными (или над числами рациональными, если они выражаются десятичными дробями с очень большим числом цифр) приходится довольствоваться приближенным результатом действия. В этом случае важно знать, как велика погрешность этого приближенного результата. Рассмотрим, как можно это делать в простейших случаях.

191. Приближения с недостатком и с избытком. Если вместо точного числа мы берем приближенное число, то это последнее называется приближением с недостатком, если оно меньше точного числа, и с избытком, если оно больше его. Разность между точным числом и его приближением называется погрешностью этого приближения. Если, напр., точное число есть 3,826 и мы вместо этого числа взяли 3,82, то это будет приближение с недостатком, причем погрешность равна 0,006; если же вместо 3,826 возьмем, положим, 3,83, то будем иметь приближение с избытком, причем погрешность окажется 0,004.

Обыкновенно точная величина погрешности остается неизвестной, а известно только, что она меньше некоторой дроби, напр. меньше $^1/_{100}$. Тогда говорят, что приближение точно до $^1/_{100}$. Пусть, напр., известно, что 2,85 есть приближение числа A с точностью до $^1/_{100}$. Это значит, что 2,85 разнится от A меньше, чем на $^1/_{100}$, так что если 2,85 есть приближение с недостатком, то точное число A заключается между 2,85 и 2,86, а если 2,85 есть приближение с избытком, то A заключается между 2,85 и 2,84. Если же остается неизвестным, будет ли приближение 2,85 с недостатком или с избытком, а известно только, что оно точно до $^1/_{100}$, то о числе A мы можем только утверждать, что оно заключается между 2,84 и 2,86.

Погрешность, о которой мы сейчас говорили, называется абсолютною погрешностью в отличие от относительной погрешности, под которою разумеют отношение абсолютной погрешности к точному числу. Так, если вместо точного числа 3,826 мы берем приближенное 3,82, то относительная погрешность будет 0,006: 3,826 = 6:3826 = 0,001568..., т. е. менее 0,002. Это значит, что, взяв приближение 3,82, мы ошиблись менее, чем на 0,002 точного числа.

Иногда относительную погрешность выражают в процентах точного числа, т. е. указывают, что погрешность менее стольких-то процентов точного числа. Так, если относительная погрешность менее 0,002 точного числа, то это значит, что она менее $0{,}2\%$ этого числа, так как

$$0{,}002 = \frac{0{,}002 \cdot 100}{100} = \frac{0{,}2}{100} = 0{,}2\%.$$

В дальнейшем мы будем говорить только об абсолютной погрешности, называя ее просто „погрешность“.

192. Десятичные приближения. Когда имеют дело с десятичными числами, то приближения их берут с точностью до $^1/_{10}$, до $^1/_{100}$ и т. д. и даже с точностью до $^1/_2$ десятичной единицы. Такие приближения находятся по следующим правилам.

а) Чтобы получить приближение с недостатком данного десятичного числа (с конечным или бесконечным числом десятичных знаков) с точностью до одной десятичной единицы какого-либо разряда, достаточно отбросить в числе все цифры, стоящие вправо от той, которая выражает единицы этого разряда.

Так, приближение с недостатком числа 3,14159... с точностью до $^1/_{100}$ есть 3,14, потому что это число меньше данного и погрешность, равная 0,159... сотой, меньше целой сотой.

б) Чтобы получить приближение с избытком данного десятичного числа с точностью до одной десятичной единицы какого-либо разряда, достаточно, отбросив в числе все цифры, стоящие вправо от той, которая выражает единицы этого разряда, увеличить на 1 последнюю из удержанных цифр.

Так, приближение с избытком числа 3,14159... с точностью до 0,001 есть 3,142, потому что это число больше данного и погрешность его меньше 0,001.

в) Чтобы получить приближение данного десятичного числа с точностью до $^1/_2$ десятичной единицы какого-либо разряда, достаточно, поступив так, как было сказано в правиле 1-м, увеличить на 1 последнюю из удержанных цифр, если первая из отброшенных цифр есть 5 или больше 5 (и тогда приближение будет с избытком), а в противном случае оставить ее без изменения (и тогда приближение будет с недостатком).

Так, приближение (с недостатком) числа 3,14159... с точностью до $^1/_2$ сотой есть 3,14, так как погрешность менее 0,5 сотой; приближение того же числа (с избытком) с точностью до

$^1/_2$ тысячной есть 3,142, так как погрешность, равная (1—0,59) тысячной, очевидно, меньше 0,5 тысячной.

193. Погрешность приближенной суммы. Из свойств арифметического сложения мы знаем, что если какое-либо слагаемое уменьшится или увеличится на некоторое число, то и сумма уменьшится или увеличится на то же число. Поэтому если все слагаемые взяты с недостатком или все с избытком, то сумма в первом случае будет с недостатком, а во втором — с избытком, причем погрешность суммы равна сумме погрешностей всех слагаемых. Если же случится, что некоторые слагаемые взяты с недостатком, а другие с избытком, то погрешность, происходящая от слагаемых с недостатком, покроется вполне или частью противоположною погрешностью от слагаемых с избытком, и потому окончательная погрешность суммы менее суммы погрешностей слагаемых. Приведем примеры:

а) Пусть требуется найти суммы:

$$\sqrt{2}+\sqrt{3}+\sqrt{5}=1{,}4142\ldots+1{,}7320\ldots+2{,}2360\ldots$$

Положим, что в каждом слагаемом мы ограничиваемся тремя десятичными знаками после запятой:

$$\begin{array}{r} 1{,}414\\ +\,1{,}732\\ 2{,}236\\ \hline 5{,}382\\ 5{,}38\\ \hline \end{array}$$

Так как все слагаемые мы взяли с недостатком, то и сумма будет с недостатком; погрешность каждого слагаемого менее $^1/_2$ тысячной, поэтому погрешность суммы 5,382 менее ($^1/_2+{}^1/_2+{}^1/_2$) тысячной, т. е. менее 1,5 тысячной. Если мы отбросим в числе 5,382 последнюю цифру 2, то еще уменьшим сумму на 2 тысячных, и погрешность числа 5,38 будет менее суммы $1{,}5+2=3{,}5$ тысячных, что в свою очередь менее 5 тысячных, т. е. менее $^1/_2$ сотой. Таким образом, 5,38 есть приближенная сумма данных слагаемых, взятая с недостатком и точная до $^1/_2$ сотой.

б) Пусть надо найти сумму пяти слагаемых, из которых

$$\begin{array}{r} 4{,}7536\\ 3{,}8086\\ +\;0{,}5070\\ 1{,}2634\\ 0{,}5679\\ \hline 10{,}9005\\ 10{,}900 \end{array}$$

каждое точно до $^1/_2$ десятитысячной, причем неизвестно, взяты ли приближения с недостатком или с избытком, или, быть может, некоторые взяты с недостатком, а другие с избытком. Тогда погрешность суммы 10,9005 будет во всяком случае меньше $\frac{1}{2}+\frac{1}{2}+\frac{1}{2}+\frac{1}{2}+\frac{1}{2}=2{,}5$ десятитысячных; если же отбросим последнюю цифру 5 этой суммы, то мы ее уменьшим на 5 десятитысячных и погрешность будет меньше $5+2{,}5=7{,}5$ десятитысячных, что меньше 10 десятитысячных, т. е. меньше 1 тысячной. Таким образом, число 10,900 есть приближенная сумма с недостатком (так как уменьшение на 5 десятитысячных больше возможного увеличения на 2,5 десятитысячных), точная до 1 тысячной.

Из этих примеров видно, что если требуется найти приближенную сумму с точностью до одной единицы какого-нибудь разряда, то мы должны в слагаемых взять десятичных знаков больше, чем их требуется иметь в окончательном результате (на 1 знак больше, если слагаемых не более 10). Пусть, напр., надо найти с точностью до 1 сотой сумму:

3,141	59..
7,869	6..
3,183	...
34,557	512..
13,011	...
33,773	6..
95,534	
95,53	

Тогда берем в слагаемых по 3 знака после запятой (отбросив все те, которые мы отделили вертикальной чертою). Число 95,534 есть приближенная сумма с недостатком, точная до 6 тысячных. Если отбросим еще последнюю цифру 4, то уменьшим сумму на 4 тысячных, и все уменьшение будет меньше 6 + 4 тысячных, т. е. менее 1 сотой. Таким образом, 95,53 есть приближенная сумма с недостатком, точная до сотой.

Заметим, что иногда последнюю цифру приближенной суммы следует увеличить на 1. Напр., положим, что в приведенном сейчас примере третий десятичный знак суммы 95,534 был бы не 4, а 9; тогда, отбросив его, мы получили бы сумму 95,53 с недостатком, с точностью до $6 + 9 = 15$ тысячных, что составляет 1,5 сотой. Если увеличим последний десятичный знак на 1, т. е. возьмем число 95,54, то мы, очевидно, уменьшим погрешность на 1 сотую, вследствие чего она будет теперь менее 1 сотой (но остается неизвестным, с недостатком или с избытком будет приближенная сумма).

194. Погрешность приближенной разности. Из свойств арифметического вычитания мы знаем, что если уменьшаемое уменьшим или увеличим, то и разность уменьшится или увеличится на столько же; если же вычитаемое уменьшим или увеличим, то разность увеличится или уменьшится на столько же. Значит, если оба данные для вычитания числа взяты с недостатком или оба с избытком, то погрешность разности равна разности погрешностей данных чисел; если же одно данное число взято с недостатком, а другое с избытком, то погрешность разности должна равняться сумме погрешностей данных чисел. Приведем примеры:

1) $\sqrt{3} - \sqrt{2} = 1{,}73205\ldots - 1{,}41421\ldots$

Положим мы взяли в каждом числе только по 3 десятичны знака после запятой:

$$\begin{array}{r} 1{,}732 \\ -\,1{,}414 \\ \hline 0{,}318 \end{array}$$

Так как оба приближения мы взяли с недостатко с точностью до $^1/_2$ тысячной, то погрешность числ 0,318, равная разности погрешностей данных чисел меньше $^1/_2$ тысячной, причем остается неизвестны будет ли приближенная разность с недостатком ил с избытком (неизвестно, какое уменьшение больше: уменьшаемо или вычитаемого).

2) Пусть требуется найти разность приближенных чисе 7,283—5,496, точных до 1 тысячной, причем неизвестно, взят ли они оба с недостатком, или оба с избытком, или одно с недостатком, а другое с избытком.

$$\begin{array}{r} 7{,}283 \\ -\,5{,}496 \\ \hline 1{,}787 \\ 1{,}78 \end{array}$$

Погрешность разности не более суммы погрешностей данных чисел, т. е. не более 2 тысячных. Если отбросим последнюю цифру 7, то погрешность будет не более $7+2=9$ тысячных, что меньше 10 тысячных $=1$ сотой.

Таким образом, если требуется найти разность данных приближенных чисел с точностью до одной единицы какого-нибудь разряда, то в данных числах можно ограничиться единицами этого разряда, отбросив все низшие разряды, если известно, что оба числа взяты с недостатком или оба с избытком; если же это неизвестно, то в данных числах надо взять одним разрядом больше, чем требуется иметь в результате, и последнюю цифру результата откинуть.

195. Погрешность приближенного произведения. Из свойств арифметического умножения мы знаем, что если один из двух сомножителей уменьшится или увеличится на какое-нибудь число, то произведение уменьшится или увеличится на это число, умноженное на другой сомножитель. Поэтому, если один из двух сомножителей точное число, а другой приближенное, то *погрешность произведения равна погрешности приближенного сомножителя, умноженной на точный сомножитель.*

Пример. Вычислить $2\pi R$, где $\pi=3{,}1415926\ldots$ и $R=2{,}4$ *м.*

Ограничиваясь приближенным значением числа π с точностью до $^1/_2$ тысячной (с избытком), получим:

$$2\pi R = 3{,}142\cdot 4{,}8 = 15{,}0816.$$

Погрешность меньше $^1/_2\cdot 4{,}8=2{,}4$ тысячной, причем приближение будет с избытком. Отбросив в результате последни две цифры, т. е. 16 десятитысячных = 1,6 тысячной, мы уменьшим результат на столько же; значит, полученное число 15,08 будет точно до 2,4 — 1,6 = 0,8 тысячной, что меньше 1 тысячной (и поэтому результат 15,08 лучше изобразить так: 15,080); при этом остается неизвестным, будет ли приближение 15,08 с избытком или с недостатком.

Когда оба сомножителя приближенные числа, погрешность произведения можно определить следующим образом. Пусть a и b будут приближения, взятые оба с недостатком, причем погрешность первого есть α, а второго β. Тогда точные числа будут $a+\alpha$ и $b+\beta$. Найдем разность между точным произведением $(a+\alpha)(b+\beta)$ и приближенным ab:

$$(a+\alpha)(b+\beta)-ab=ab+\alpha b+a\beta+\alpha\beta-ab=\alpha b+a\beta+\alpha\beta.$$

Так как числа α и β небольшие, то произведение $\alpha\beta$ настолько мало, что им можно пренебречь (напр., если $\alpha<0{,}001$ и $\beta<0{,}001$, то $\alpha\beta<0{,}000001$). Тогда можно сказать, что погрешность приближенного произведения ab равна $\alpha b+a\beta$, т. е. она равна *сумме произведений погрешности каждого приближенного сомножителя на другой сомножитель.* Если оба сомножителя взяты с избытком, то точные числа будут $a-\alpha$ и $b-\beta$ и тогда

$$ab-(a-\alpha)(b-\beta)=ab-ab+\alpha b+a\beta-\alpha\beta=\alpha b+\beta a-\alpha\beta,$$

или, пренебрегая попрежнему числом $\alpha\beta$,

$$ab-(a-\alpha)(b-\beta)=\alpha b+\beta a,$$

т. е. погрешность приближенной суммы выражается тою же суммою, какую мы нашли раньше.

Приложим сказанное к следующему примеру.

$$\sqrt{3}\cdot\sqrt{2}=1{,}73205\ldots\times 1{,}41422\ldots$$

Ограничиваясь четырьмя десятичными знаками после запятой, перемножим приближения с недостатком, взятые с точностью до 0,0001:

$$1{,}7320\cdot 1{,}4142=2{,}44939440$$

Так как каждое из взятых приближений меньше 2, то погрешность найденного приближенного произведения меньше $0{,}0001\cdot 2+0{,}0001\cdot 2$, т. е. меньше 4 десятитысячных, причем оно будет с недостатком. Если в этом произведении отбросим цифры 9440, то уменьшим еще произведение на число, меньшее 4 десятитысячных; тогда получим произведение 2,449, точное до $4+4=8$ десятитысячных, что меньше 10 десятитысячных $=$ 1 тысячной. Значит, приближенное произведение 2,449 будет с недостатком и точное до 0,001.

В частном случае, когда речь идет, как в нашем примере, об умножении квадратных корней, произведение мы можем найти проще, так: принимая во внимание, что $\sqrt{3}\cdot\sqrt{2}=\sqrt{6}$, извлечем из 6 приближенный квадратный корень с желаемою точностью. Так, извлекая корень до тысячных долей, получим то же число 2,449, которое мы получили выше иным путем.

196. Сокращенное умножение. Укажем еще следующий прием *сокращенного умножения*, который позволяет быстро найти произведение с заранее заданною точностью. Пусть требуется найти с точностью до 0,001 произведение:

$$314{,}159265358\ldots\times 74{,}632543926\ldots$$

Мы сначала укажем, как производится сокращенное умножение, а потом объясним, почему.

Подписываем цифры множителя под множимым *в обратном порядке* справа налево так, чтобы цифра его простых единиц стояла под тою цифрою множимого, которая выражает единицы *во 100 раз* меньшие единицы разряда, выражающего данную точность, т. е. в нашем случае под цифрою 6 стотысячных:

$314{,}159265\boxed{358}$	
$\boxed{62}934\ 523647$	
2199 114855	погрешность < 7 стотыс.
125 663704	„ < 4 „
18 849552	„ < 6 „
942477	„ < 3 „
62830	„ < 2 „
15705	„ < 5 „
1256	„ < 4 „
93	„ < 3 „
27	„ < 9 „
23446 50499	
23446,505	

Затем умножаем множимое на каждую цифру множителя, не обращая при этом внимания на цифры множимого, стоящие вправо от той цифры множителя, на которую умножаем. Все эти частные произведения подписываем одно под другим так, чтобы первые справа их цифры стояли в одном вертикальном столбце, после чего их сложим. В полученном числе отбрасываем две последние цифры и увеличиваем на 1 последнюю из оставшихся цифр. Наконец, ставим запятую так, чтобы последняя цифра выражала единицы требуемого разряда, т. е. в нашем случае тысячные доли. Полученное число 23446,505 будет точно до 0,001 (остается неизвестным, с недостатком или с избытком).

Теперь объясним этот прием сокращенного умножения.

Прежде всего убедимся в том, что все частные произведения выражают единицы одного и того же разряда, именно во 100 раз меньшие единицы данного разряда (в нашем примере — стотысячные доли). Действительно, умножая на первую цифру 7 число 314159265, мы умножаем миллионные доли на десятки, значит, получаем в произведении стотысячные доли. Далее, умножая на 4 число 31415926, мы умножаем стотысячные доли на простые единицы; значит, получаем снова в произведении стотысячные доли, и т. д. Из этого следует, что сумма 2344650499 выражает стотысячные доли, т. е. она есть число 23446,50499. Покажем теперь, что погрешность в окончательном результате меньше 0,001.

Так как часть множимого, написанная направо от цифры 7 множителя, меньше 1 миллионной, то, пренебрегая произведением этой части на 70, мы уменьшаем результат на число, меньшее 7 стотысячных. Далее, так как часть множимого, написанная направо от цифры 4 множителя, меньше 1 стотысячной, то, пренебрегая произведением этой части на 4 простые единицы, мы уменьшаем результат на число, меньшее 4 стотысячных. Рассуждая подобным образом относительно всех прочих цифр множителя, на которые приходится умножать, заметим, что мы уменьшаем результат на число, меньшее $7+4+6+$ $+3+2+5+4+3+9$ стотысячных. Наконец, так как множимое меньше 1 тысячи, а часть множителя, написанная влево от множимого (на которую, следовательно, не приходится умножать вовсе), меньше $2+1$ стомиллионных, то, пренебрегая произведением множимого на эту часть множителя, мы еще уменьшаем результат на число, меньшее $2+1$ стотысячных. Следовательно, беря вместо точного произведения число 23446,50499, мы уменьшаем первое на число меньшее $(7+4+6+3+2+5+4+$

$+3+9)+2+1$ стотысячных, т. е. вообще меньшее 101 стотысячной, если только сумма цифр множителя, на которые приходится умножать, увеличенная на первую из отбрасываемых его цифр, не превосходит 100[1]) (это всегда имеет место, если число частных произведений не превосходит 10). Кроме того, отбрасывая две последние цифры результата, мы снова уменьшаем произведение на число, не превосходящее 99 стотысячных. Поэтому все уменьшение будет менее $101+99$ стотысячных, т. е. менее 2 тысячных; если же последнюю цифру увеличим на 1, т. е. на 1 тысячную, то результат 23446,505 разнится от точного произведения менее, чем на 2—1 тысячной, т. е. менее одной тысячной (причем остается неизвестным, будет ли он с избытком или с недостатком).

Заметим, что увеличивать на 1 последнюю из удержанных цифр произведения не всегда необходимо. Это нужно было сделать в рассмотренном примере, потому что там погрешность произведения (до увеличения на 1 последней его цифры) менее суммы

$$(7+4+6+3+2+5+4+3+9)+2+1+99 \text{ стотысячных} =$$
$$= 145 \text{ стотысячных},$$

которая заключается между 100 и 200 стотысячных. Но если бы отбрасываемые 2 цифры были не 99, а напр. 25, то погрешность произведения оказалась бы меньше суммы

$$(7+4+6+3+2+5+4+3+9)+2+1+25 \text{ стотысячных} =$$
$$= 71 \text{ стотысячных},$$

что, в свою очередь, меньше 100 стотысячных, т. е. меньше 1 тысячной. Значит, тогда не нужно было бы увеличивать последнюю цифру на 1. В этом случае произведение было бы с недостатком.

Замечание. В применении правила сокращенного умножения мы не обращаем никакого внимания на те цифры множимого, которые стоят вправо от множителя, и на те цифры множителя, которые стоят влево от множимого; и те и другие мы можем совсем отбросить. Таким образом, во множимом и во множителе нужных цифр должно быть одно и то же число; нетрудно заранее определить, *сколько цифр должно быть, чтобы произведение было с заданною точностью*. Разъясним это на примере.

---

[1]) Если эта сумма не превосходит 10, то достаточно написать цифру простых единиц множителя под тою цифрою множимого, которая выражает единицы, в 10 раз меньшие единицы данного разряда, и в полученном произведении отбросить одну цифру справа.

Пусть требуется вычислить до $^1/_{100}$ произведение

$$1000\pi(\sqrt{5}-1),$$

где π есть отношение окружности к диаметру, равное 3,1415926535... Обращая внимание на последнее умножение, рассуждаем так: искомое произведение должно быть вычислено до одной сотой; значит, цифра простых единиц множителя (т. е. $\sqrt{5}-1$) должна стоять под четвертым десятичным знаком множимого; с другой стороны, во множителе $(\sqrt{5}-1)$ нет разрядов выше простых единиц; из этого заключаем, что больше 4 десятичных знаков во множимом, т. е. в 1000π, бесполезно вычислять. Значит 1000π надо взять равным 3141,5926; следовательно, и во множителе, т. е. в $\sqrt{5}-1$, надо вычислить 8 цифр. Извлечением находим, что $\sqrt{5}=2,2360679$ и, следовательно, $\sqrt{5}-1=1,2360679$.

Действие выполняется так:

$$\begin{array}{r l}
1000\pi = 3141{,}592\ 6 & \\
9760\ 632{,}1 & = \sqrt{5}-1 \\
\hline
3141\ 592\ 6 & \\
628\ 318\ 4 & \\
91\ 247\ 7 & \\
18\ 849\ 0 & \\
188\ 4 & \\
21\ 7 & \\
2\ 7 & \\
\hline
3883\ 220\ 5 & \\
3883{,}22 & \\
\hline
\end{array}$$

197. Погрешность приближенного частного. Если делимое приближенное число, а делитель точное число, то *погрешность частного равна частному от деления погрешности приближенного делимого на точный делитель*, причем приближенное частное будет с недостатком или с избытком, смотря по тому, с недостатком или с избытком взято приближенное делимое.

Для примера вычислим частное:

$$0{,}538207\ldots : {^3/_7} = \frac{0{,}538207\ldots \times 7}{3}.$$

Ограничиваясь в делимом тремя десятичными знаками, произведем умножение:

$$0{,}538\cdot 7 = 3{,}766.$$

Мы получили произведение с недостатком с точностью до $^1/_2\cdot 7 = 3^1/_2$ тысячной, и потому частное $3{,}766:3 = 1{,}25533\ldots$ будет тоже с недостатком, причем погрешность должна быть менее $3^1/_2:3 = 1^1/_6$ тысячной. Если в полученном частном отбросим цифры, следующие за цифрой сотых, т. е. возьмем только 1,25, то еще уменьшим частное на число, меньшее 6 тысячных; значит, погрешность числа 1,25 будет меньше $6 + 1^1/_6 = 7^1/_6$ тысячной, что меньше 10 тысячных, т. е. меньше 1 сотой.

198. Сокращенное деление. Когда делитель приближенное число, а делимое точное или тоже приближенное, тогда затруднительно определить предел погрешности частного. В этом случае лучше всего пользоваться сокращенным приемом деления, который позволяет сравнительно быстро найти частное с заданною наперед точностью.

Чтобы уяснить этот сокращенный прием, мы предварительно докажем следующую вспомогательную истину: *если делитель есть целое число с дробью и мы откинем в нем эту дробь, то частное увеличится на число, меньшее этого частного, деленного на целую часть делителя.*

Пусть делимое будет A, делитель B и дробная часть делителя a. Тогда целая часть делителя равна $B - a$ и точное частное $= \frac{A}{B}$, приближенное частное $= \frac{A}{B-a}$; увеличение частного $=$

$$= \frac{A}{B-a} - \frac{A}{B} = \frac{AB - AB + Aa}{(B-a)B} = \frac{Aa}{(B-a)B} = \frac{Aa}{B}:(B-a).$$

Так как $a < 1$, то $Aa < A$; поэтому

$$\text{увеличение частного} < \frac{A}{B}:(B-a),$$

т. е. оно менее частного, деленного на целую часть делителя.

Положим теперь, что требуется найти с точностью до 0,01 частное:

$$31\,415{,}92653\ldots : 432{,}639\ldots$$

Мы сначала укажем, как производится сокращенное деление, а потом объясним, почему.

Узнаем, сколько цифр должно быть в приближенном частном. Так как делимое больше делителя, умноженного на 10, но меньше делителя, умноженного на 100, то в целой части частного должно быть 2 цифры. Так как частное должно быть вычислено до сотых долей, то всех цифр в приближенном частном должно быть 4.

Возьмем теперь эту цифру 4 и припишем к ней столько нулей, сколько единиц означает она; получим 40 000 [1]. Теперь отделим в делителе слева (не обращая внимания на запятую) столько цифр, чтобы образовалось число, большее (или равное) 40 000; тогда делитель сделается 43 263. Остальные цифры делителя отбрасываем. В делимом возьмем слева столько цифр (не обращая внимания на запятую), чтобы в образованном ими числе укороченный делитель мог содержаться (не более 9 раз); тогда делимое будет 314 159. Остальные цифры делимого отбрасываем.

Разделив это делимое на делитель, находим первую цифру частного 7 и первый остаток 11 318. После этого зачеркиваем в делителе одну правую цифру 3 и делим остаток 11 318 на оставшиеся цифры делителя 4326. Получаем вторую цифру частного 2 и второй остаток 2666. Зачеркиваем в делителе еще одну цифру справа, т. е. 6, и делим второй остаток на 432. Получаем третью цифру частного 6 и третий остаток 74. Продолжаем так действие далее (зачеркивая в делителе при каждом частном делении по одной цифре справа), пока не получим всех цифр частного. Наконец, в полученном частном ставим запятую так, чтобы последняя цифра справа выражала единицы требуемого разряда (в нашем примере сотые доли).

$$\begin{array}{r|l}
314159 & 43263 \\ \cline{2-2}
302841 & \;72{,}61 \\ \cline{1-1}
11318 & \\
8652 & \\ \cline{1-1}
2666 & \\
2592 & \\ \cline{1-1}
74 & \\
43 & \\ \cline{1-1}
31 &
\end{array}$$

Теперь объясним этот процесс сокращенного деления. Прежде всего приведем вопрос к нахождению частного не с точностью до 0,01, как требуется, а с точностью до целой единицы, причем делитель был бы число, не меньшее 40 000 (т. е. того числа, у которого первая цифра и число нулей равны числу цифр в частном). Для этого достаточно: 1) увеличить делимое в 100 раз, от чего увеличится во столько же раз частное и, следовательно, погрешность его; 2) перенести в делимом и в делителе запятую вправо на одно и то же число цифр (от чего частное не изменится), именно на столько, чтобы делитель сделался не меньшим 40 000. Теперь вопрос приводится к нахождению с точностью до единицы частного:

---

[1] Если бы в частном было 3 цифры мы к цифре 3 приписали бы 3 нуля (получили бы 3000), если бы в частном было 2 цифры, мы приписали бы к цифре 2 два нуля (получили бы 200); и т. п.

$$314\,159\,265{,}3\ldots : 43\,263{,}9\ldots$$

Отбросим в делителе дробную часть; от этого, по доказанному выше, мы увеличим частное на число, меньшее этого частного, деленного на целую часть делителя. Но частное, содержа в целой части 4 цифры, менее 10 000, а целая часть делителя взята нами больше 40 000; значит, мы увеличим частное на число, меньшее 10 000 : 40 000, т. е. меньшее $^1/_4$. Запомнив это, будем находить частное:

$$314\,159\,265{,}3\ldots : 43\,263.$$

Чтобы найти первую цифру частного, т. е. тысячи, мы должны разделить число тысяч делимого (314 159) на делитель. Это мы и сделали в нашем сокращенном делении, получив цифру 7. Остаток от точного делимого будет 11 318 265,3... Этот остаток надо разделить на 43 263. Разделив оба эти числа на 10, мы приводим вопрос к делению 1 131 826,53... на 4326,3. Это частное имеет в целой части только 3 цифры; значит, оно меньше 1000. Отбросив в делителе дробь, мы еще увеличим частное на число, меньшее 1000 : 4000, т. е. меньше, чем на $^1/_4$; Запомнив это, будем находить частное 1 131 826,53... : 4326. Чтобы найти первую цифру этого частного, т. е. сотни, надо число сотен делимого (11 318) разделить на делитель (4326). Это мы и сделали в нашем сокращенном делении, получив в частном вторую цифру 2.

Продолжая эти рассуждения далее, увидим, что при получении каждой цифры частного мы его увеличиваем менее, чем на $^1/_4$.

Так как всех цифр в частном 4, то в результате мы увеличим частное менее чем на 1. С другой стороны, не деля остатка 31... на последний делитель 43, мы уменьшаем частное менее, чем на 1. Значит, мы увеличили его менее, чем на 1, и уменьшили менее, чем на 1; следовательно, результат, во всяком случае, точен до 1.

Остается теперь поставить запятую на надлежащем месте. получим 72,61 с точностью до 0,01.

199. Замечание. Приведенное правило и его объяснение не требуют никакого изменения в том частном случае, когда какое-нибудь делимое содержит соответствующий делитель 10 раз. Тогда ставим в частном число 10 (в скобках). Продолжая деление, увидим, что все следующие цифры частного должны быть нули. Пусть, напр., требуется найти частное

$$485\,172{,}923\ldots : 78{,}254342\ldots$$

с точностью до 1. Применяя правило, найдем:

$$\begin{array}{r|l} 485\,172 & 78254 \\ \cline{2-2} \underline{469\,524} & 61(10)0 \\ 15\,648 & 6200 \\ \underline{7\,825} & \\ 7\,823 & \\ \underline{7\,820} & \\ 3 & \end{array}$$

Третье делимое (7823) содержит соответствующий делитель (782) десять раз; пишем в частном число 10. Следующая цифра в частном оказалась 0. Искомое частное есть число 61(10)0, т. е. 6200.

В этом случае приближенное частное больше точного частного. Действительно, цифры частного, найденные раньше, чем представился этот случай, не могут быть меньше, чем бы следовало, так как мы при каждом частном делении брали делители, которые меньше точного делителя. Значит, первые две цифры точного частного должны выражать число, не большее

поэтому оно меньше числа 6200.

Примером применения предыдущих правил может служить ующая задача.

200. Задача. Вычислить с точностью до $^1/_{100}$ выражение:

$$x = \frac{\sqrt{348} - \sqrt{127}}{\sqrt{2} + \sqrt{3} + \sqrt{5} - \sqrt{12}}.$$

Это выражение есть частное; поэтому, прежде всего, определим, сколько должно быть цифр в этом частном, а для этого надо знать высший разряд его. Начав извлечение $\sqrt{348}$ и $\sqrt{127}$, мы увидим, что первый корень в целой своей части содержит 18, а второй 11; следовательно, числитель равен приблизительно 7, знаменатель равен приблизительно 2. Значит, высший разряд в частном — простые единицы. Так как частное требуется вычислить до сотых долей, то в нем должно быть 3 цифры. Поэтому знаменатель мы должны вычислить настолько точно, чтобы из него можно было (по правилу сокращенного деления) образовать число, большее 3000, для чего достаточно вычислить его 5 цифр, а для этого необходимо (по правилу сокращенного сложения) найти отдельные корни знаменателя с 6 цифрами. Произведя извлечение, найдем:

$\sqrt{2}=1{,}41421$; $\sqrt{3}=1{,}73205$; $\sqrt{5}=2{,}23606$; $\sqrt{12}=3{,}46410$ и затем:

$$\sqrt{2}+\sqrt{3}+\sqrt{5}-\sqrt{12}=1{,}9183 \text{ (до } {}^1/_{10000}).$$

Теперь надо вычислить числитель с такой точностью, чтобы из первых его цифр можно было образовать число, большее 19183. Так как числитель равен приблизительно 7, то сверх целого числа в нем потребуется вычислить еще 4 десятичных знака, а так как числитель есть разность, то уменьшаемое и вычитаемое надо вычислить также до четвертого десятичного знака. Извлечением находим:

$$\sqrt{348}=18{,}6547;\ \sqrt{127}=11{,}2694;$$
$$\sqrt{348}-\sqrt{127}=7{,}3853.$$

Остается разделить по правилу сокращенного деления 73853 на 19183, после чего получим:

$$x=3{,}85 \text{ (до } {}^1/_{100}).$$

Глава четвертая.

Преобразование иррациональных выражений.

201. Рациональные и иррациональные алгебраические выражения. Алгебраическое выражение называется рациональным относительно какой-нибудь буквы, входящей в это выражение, если эта буква не стоит под знаком радикала; в противном случае выражение называется иррациональным относительно этой буквы. Напр., выражение $3a+2\sqrt{x}$ есть рациональное относительно a и иррациональное относительно x.

Если говорят: „рациональное (или иррациональное) алгебраическое выражение“, не добавляя относительно каких букв, то предполагается, что оно рационально (или иррационально) относительно всех букв, входящих в выражение.

202. Основное свойство радикала. Заметим, что корни (радикалы), о которых мы будем говорить в этой главе, разумеются только арифметические. Возьмем какой-нибудь радикал, напр. $\sqrt[3]{a}$, и возвысим подкоренное число в какую-нибудь степень, напр. в квадрат; вместе с тем умножим показатель радикала на показатель той степени, в какую мы возвысили подкоренное число, т. е. в нашем случае умножим на 2. Тогда получим новый радикал: $\sqrt[6]{a^2}$. Докажем, что от этих двух операций величина радикала не изменилась.

Предположим, что мы вычислили $\sqrt[3]{a}$ и получили некоторое число x. Тогда мы можем написать равенства:

$$x=\sqrt[3]{a} \text{ и } x^3=a.$$

Возвысив обе части последнего равенства в квадрат, получим:

$$(x^3)^2=a^2, \text{ т. е. } x^6=a^2.$$

Из последнего равенства видно, что $x=\sqrt[6]{a^2}$.

Таким образом, одно и то же число x равно и $\sqrt[3]{a}$, и $\sqrt[6]{a^2}$; следовательно:

$$\sqrt[3]{a}=\sqrt[6]{a^2}.$$

Подобно этому можно убедиться, что:

$$\sqrt{a}=\sqrt[4]{a^2}=\sqrt[6]{a^3}=\sqrt[8]{a^4}=\dots$$

$$\sqrt[3]{m^2}=\sqrt[6]{m^4}=\sqrt[9]{m^6}=\sqrt[12]{m^8}=\dots$$

$$\sqrt{1+x}=\sqrt[4]{(1+x)^2}=\sqrt[6]{(1+x)^3}=\dots$$

Вообще, *величина радикала не изменится, если подкоренное выражение возвысим в какую-нибудь степень и вместе с тем показатель радикала умножим на показатель той степени, в которую возвысили подкоренное выражение.*

203. Некоторые преобразования радикалов.

а) *Радикалы разных степеней можно привести к одинаковым показателям* (подобно тому, как дроби с разными знаменателями можно привести к одному знаменателю). Для этого достаточно найти общее кратное (лучше всего наименьшее) показателей всех радикалов и умножить показатель каждого из них на соответствующий дополнительный множитель, возвысив, вместе с тем, каждое подкоренное выражение в надлежащую степень.

Пример.

$$\sqrt{ax}, \quad \sqrt[3]{a^2}, \quad \sqrt[6]{x}.$$

Наименьшее кратное показателей радикалов есть 6; дополнительные множители будут: для первого радикала 3, для второго 2 и для третьего 1. Тогда

$$\sqrt{ax}=\sqrt[6]{(ax)^3}=\sqrt[6]{a^3x^3};\quad \sqrt[3]{a^2}=\sqrt[6]{(a^2)^2}=\sqrt[6]{a^4},\quad \sqrt[6]{x}.$$

б) *Если подкоренное выражение есть степень, показатель которой имеет общий множитель с показателем радикала, то на этот множитель можно сократить обоих показателей.*

Примеры.

$$1)\ \sqrt[6]{x^2}=\sqrt[3]{x};\quad 2)\ \sqrt[6]{(1+x)^3}=\sqrt{1+x}.$$

в) *Если подкоренное выражение есть произведение нескольких степеней, показатели которых имеют один и тот же общий множитель с показателем радикала, то на этот множитель можно сократить все показатели.*

Пример.

$$\sqrt[6]{8a^6x^3}=\sqrt[6]{(2a^2x)^3}=\sqrt{2a^2x}.$$

204. Подобные радикалы. Подобными радикалами называются такие, у которых одинаковы подкоренные выражения и одинаковы показатели радикалов. Таковы, напр., выражения:

$$+3a\sqrt[3]{xy}\quad \text{и}\quad -5b\sqrt[3]{xy}.$$

Чтобы определить, подобны ли между собою данные радикалы, следует предварительно упростить их, т. е. если возможно:

1) вынести из-под знака радикала тех множителей, из которых можно извлечь корень (§ 169, а);

2) освободиться под радикалами от знаменателей дробей (§ 169, в);

3) понизить степень радикала, сократив показатели радикала и подкоренного числа на их общий множитель, если такой есть.

Примеры.

1) Радикалы $\sqrt[3]{8ax^3}$ и $\sqrt[6]{64a^2y^{12}}$ окажутся подобными, если упростим их:

$$\sqrt[3]{8ax^3}=2x\sqrt[3]{a};\quad \sqrt[6]{64a^2y^{12}}=2y^2\sqrt[6]{a^2}=2y^2\sqrt[3]{a}.$$

2) Три радикала $\sqrt{\frac{2x}{3}}$, $\sqrt{\frac{6}{x}}$, $\sqrt{6x}$ окажутся подобными, если освободимся под радикалами от знаменателей:

$$\sqrt{\frac{2x}{3}}=\sqrt{\frac{2x\cdot3}{3\cdot3}}=\sqrt{\frac{6x}{3^2}}=\frac{\sqrt{6x}}{3}=\frac{1}{3}\sqrt{6x};$$

$$\sqrt{\frac{6}{x}}=\sqrt{\frac{6x}{x^2}}=\frac{\sqrt{6x}}{x}=\frac{1}{x}\sqrt{6x}.$$

205. Действия над иррациональными одночленами. а) Сложение и вычитание. Чтобы сложить или вычесть иррациональные одночлены, соединяют их знаками плюс или минус и делают приведение подобных членов, если они окажутся.

Примеры.

1) $\frac{2}{3}x\sqrt{9x}+6x\sqrt{\frac{x}{4}}-x^2\sqrt{\frac{1}{x}}=$

$=2x\sqrt{x}+3x\sqrt{x}-x\sqrt{x}=4x\sqrt{x}.$

2) $15\sqrt[3]{4}-3\sqrt[3]{32}-16\sqrt[3]{\frac{1}{16}}-\sqrt[3]{108}=$

$=15\sqrt[3]{4}-6\sqrt[3]{4}-4\sqrt[3]{4}-3\sqrt[3]{4}=2\sqrt[3]{4}.$

б) Умножение. Мы видели прежде (§ 168), что для извлечения корня из произведения достаточно извлечь его из каждого сомножителя отдельно; значит, наоборот, *чтобы перемножить несколько радикалов одинаковой степени, достаточно перемножить подкоренные числа*. Так:

$$\sqrt{a}\sqrt{b}\sqrt{c}=\sqrt{abc};\qquad \sqrt[3]{x}\sqrt[3]{y}=\sqrt[3]{xy}.$$

Если для перемножения даны радикалы с различными показателями, то их можно предварительно привести к одному показателю.

Если перед радикалами имеются коэффициенты, то их перемножают.

Примеры.

1) $a\sqrt{2x}\cdot\frac{a}{b}\sqrt{3ax}=\frac{a^2}{b}\sqrt{6x^2}=\frac{a^2x}{b}\sqrt{6}.$

2) $\sqrt{3}\cdot\sqrt[3]{\frac{1}{3}}\cdot\sqrt{\frac{1}{2}}=\sqrt[6]{3^3}\cdot\sqrt[6]{\left(\frac{1}{3}\right)^2}\cdot\sqrt[6]{\left(\frac{1}{2}\right)^3}=$

$=\sqrt[6]{3^3\cdot\frac{1}{3^2}\cdot\frac{1}{2^3}}=\sqrt[6]{\frac{3^3}{3^2\cdot2^3}}=\sqrt[6]{\frac{3}{2^3}}=\sqrt[6]{\frac{3}{8}}.$

в) Деление. Мы знаем, что для извлечения корня из дроби достаточно извлечь его из числителя и знаменателя отдельно (§ 163, в); значит, и наоборот:

$$\frac{\sqrt{a}}{\sqrt{b}}=\sqrt{\frac{a}{b}};\qquad \frac{\sqrt[3]{a}}{\sqrt[3]{b}}=\sqrt[3]{\frac{a}{b}}\text{, и т. д.,}$$

т. е., *чтобы разделить радикалы с одинаковыми показателями, достаточно разделить их подкоренные числа.*

Радикалы с различными показателями можно привести предварительно к одинаковым показателям.

Если есть коэффициенты, то их делят.

Примеры.

$$1)\quad -6\sqrt{\frac{2a-2b}{x^2}}:\frac{4}{5}\sqrt{\frac{a-b}{2bx^2}}=-\frac{6}{4}\frac{5}{}\sqrt{\frac{2(a-b)2bx^2}{x^2(a-b)}}=-15\sqrt{b}.$$

$$2)\quad \frac{3a}{5b}\sqrt[3]{\frac{a^2}{a-x}}:\frac{2a}{5b}\sqrt{\frac{2a}{a-x}}=\frac{3}{2}\left(\sqrt[6]{\frac{a^4}{(a-x)^2}}:\sqrt[6]{\frac{8a^3}{(a-x)^3}}\right)=$$

$$=\frac{3}{2}\sqrt[6]{\frac{a(a-x)}{8}}.$$

г) Возвышение в степень. *Чтобы возвысить радикал в степень, достаточно возвысить в эту степень подкоренное число.*

Так:

$$\left(\sqrt[3]{a}\right)^2=\sqrt[3]{a}\cdot\sqrt[3]{a}=\sqrt[3]{a^2};\qquad \left(\sqrt[n]{x}\right)^m=\sqrt[n]{x}\cdot\sqrt[n]{x}\cdot\sqrt[n]{x}\ldots=\sqrt[n]{x^m}.$$

Примеры.

$$1)\quad \left(\sqrt[4]{2ab^3x^2}\right)^3=\sqrt[4]{(2ab^3x^2)^3}=\sqrt[4]{8a^3b^9x^6}=b^2x\sqrt[4]{8a^3bx^2}.$$

$$2)\quad \left(\sqrt[6]{\frac{2x}{1+x}}\right)^3=\sqrt[6]{\left(\frac{2x}{1+x}\right)^3}=\sqrt{\frac{2x}{1+x}}.$$

д) Извлечение корня. *Чтобы извлечь корень из радикала, достаточно перемножить их показателей*

Так:

$$\sqrt{\sqrt[3]{a}}=\sqrt[6]{a}.$$

Чтобы убедиться в этом, положим, что $\sqrt{\sqrt[3]{a}}=x$. Возвысив обе части этого равенства сначала в квадрат, а потом в куб, найдем:

$$\sqrt[3]{a}=x^2; \qquad a=(x^2)^3=x^6.$$

Отсюда видно, что $x=\sqrt[6]{a}$, и, следовательно, $\sqrt{\sqrt[3]{a}}=\sqrt[6]{a}$.

Пример.

$$\sqrt{2x\sqrt[3]{x^2}}.$$

Подведя сомножитель $2x$ под знак радикала 3-й степени, получим:

$$\sqrt{\sqrt[3]{(2x)^3x^2}}=\sqrt[6]{8x^5}.$$

206. Действия над иррациональными многочленами производятся по тем же правилам, какие были выведены для многочленов рациональных. Напр.:

$$\left(\frac{2}{5}\sqrt{5}-5\sqrt{0,3}\right)^2=\frac{4}{5}-4\sqrt{1,5}+7,5=8,3-4\sqrt{1,5}.$$

207. Освобождение знаменателя дроби от радикалов. При вычислении дробных выражений, знаменатели которых содержат радикалы, бывает полезно предварительно преобразовать дробь так, чтобы знаменатель ее не содержал радикалов. Пусть, напр., надо вычислить:

$$x=\frac{1}{\sqrt{3}-\sqrt{2}}. \qquad (1)$$

Мы можем производить вычисление или прямо по этой формуле, или же предварительно сделать ее знаменатель рациональным, для чего достаточно умножить оба члена данной дроби на сумму $\sqrt{3}+\sqrt{2}$:

$$x=\frac{\sqrt{3}+\sqrt{2}}{(\sqrt{3}-\sqrt{2})(\sqrt{3}+\sqrt{2})}=\frac{\sqrt{3}+\sqrt{2}}{3-2}=\sqrt{3}+\sqrt{2}. \qquad (2)$$

Формула (2) удобнее для вычисления, чем формула (1), во-первых, потому, что она содержит в себе всего 3 действия, а не 4, как формула (1), а, во-вторых, и потому, что при вычислении, которое по необходимости может быть только приближенное, Погрешность результата сравнительно просто определяется по формуле (2). Так, найдя $\sqrt{3}$ и $\sqrt{2}$ с точностью до половины тысячной доли, получим:

$$x = 1{,}732 + 1{,}414 = 3{,}146.$$

Результат этот точен до $\frac{1}{2} + \frac{1}{2}$ тысячной, т. е. до $\frac{1}{1000}$.

Приведем некоторые простейшие примеры освобождения знаменателей от квадратных радикалов.

1) $\frac{3}{2\sqrt{5}}$. Умножим оба члена дроби на $\sqrt{5}$:

$$\frac{3\sqrt{5}}{2(\sqrt{5})^2} = \frac{3\sqrt{5}}{2\cdot 5} = \frac{3\sqrt{5}}{10} = 0{,}3\sqrt{5}.$$

Если под знаком радикала стоит целое составное число, то иногда бывает полезно разложить его на простые сомножители с целью определить, каких множителей недостает в нем для того, чтобы оно было полным квадратом. Тогда достаточно умножить оба члена дроби на квадратный корень из произведения только недостающих сомножителей. Напр.:

$$\frac{3}{\sqrt{40}} = \frac{3}{\sqrt{2\cdot 2\cdot 2\cdot 5}} = \frac{3\cdot\sqrt{2\cdot 5}}{\sqrt{2^3\cdot 5}\cdot\sqrt{2\cdot 5}} = \frac{3\sqrt{10}}{\sqrt{2^4\cdot 5^2}} = \frac{3\sqrt{10}}{2^2\cdot 5} = \frac{3}{20}\sqrt{10}.$$

2) $\frac{2}{3+\sqrt{5}}$. Умножим оба члена дроби на разность $3-\sqrt{5}$:

$$\frac{2(3-\sqrt{5})}{(3+\sqrt{5})(3-\sqrt{5})} = \frac{6-2\sqrt{5}}{3^2-5} = \frac{6-2\sqrt{5}}{4} = \frac{3-\sqrt{5}}{2}.$$

3) $\frac{2}{3-\sqrt{5}}$. Умножим оба члена дроби на сумму $3+\sqrt{5}$:

$$\frac{2(3+\sqrt{5})}{(3-\sqrt{5})(3+\sqrt{5})} = \frac{6+2\sqrt{5}}{3^2-5} = \frac{3+\sqrt{5}}{2}.$$

4) $\frac{5}{\sqrt{3}+\sqrt{2}}$. Умножим оба члена дроби на $\sqrt{3}-\sqrt{2}$:

$$\frac{5(\sqrt{3}-\sqrt{2})}{(\sqrt{3}+\sqrt{2})(\sqrt{3}-\sqrt{2})} = \frac{5\sqrt{3}-5\sqrt{2}}{3-2} = 5\sqrt{3}-5\sqrt{2}.$$

5) $$\frac{5}{\sqrt{3}-\sqrt{2}} = \frac{5(\sqrt{3}+\sqrt{2})}{(\sqrt{3}-\sqrt{2})(\sqrt{3}+\sqrt{2})} = \frac{5\sqrt{3}+5\sqrt{2}}{3-2} =$$
$$= 5\sqrt{3}+5\sqrt{2}.$$

6) $\frac{4\sqrt{2}}{2+\sqrt{2}+\sqrt{6}}$. Умножим оба члена дроби на разность $2+\sqrt{2}-\sqrt{6}$:

$$\frac{4\sqrt{2}}{2+\sqrt{2}+\sqrt{6}}=\frac{4\sqrt{2}\,(2+\sqrt{2}-\sqrt{6})}{(2+\sqrt{2})^2-(\sqrt{6})^2}=\frac{8\sqrt{2}+8-4\sqrt{12}}{4+4\sqrt{2}+2-6}=$$
$$=\frac{8\sqrt{2}+8-8\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}.$$

Умножив затем оба члена дроби на $\sqrt{2}$, получим:

$$\frac{16+8\sqrt{2}-8\sqrt{6}}{8}=2+\sqrt{2}-\sqrt{6}.$$

ОТДЕЛ ДЕВЯТЫЙ.

НЕКОТОРЫЕ УРАВНЕНИЯ СТЕПЕНИ ВЫШЕ ПЕРВОЙ.

Глава первая.

Квадратное уравнение.

208. Задача. Моторная лодка спустилась по течению реки на расстояние 28 *км* и тотчас же вернулась назад; на это ей потребовалось 7 часов. Найти скорость движения лодки в стоячей воде, если известно, что вода в реке движется со скоростью 3 *км* в час.

Пусть скорость движения лодки в стоячей воде будет x *км* в час; тогда по течению реки она двигалась со скоростью $(x+3)$ *км* в час, а против течения со скоростью $(x-3)$ *км* в час. Следовательно, 28 *км* лодка прошла в $\frac{28}{x+3}$ часов, когда двигалась по течению, и в $\frac{28}{x-3}$ часов, когда возвращалась назад.

Согласно условию задачи мы имеем уравнение:

$$\frac{28}{x+3}+\frac{28}{x-3}=7.$$

Освободив от знаменателей, получим:

$$28(x-3)+28(x+3)=7(x+3)(x-3),$$

т. е.

$$28x-84+28x+84=7(x^2-9)=7x^2-63,$$

или

$$56x=7x^2-63.$$

Мы получили уравнение, в котором есть член, содержащий неизвестное во второй степени, но нет членов, содержащих неизвестное в более высоких степенях. Такое уравнение называется уравнением второй степени, или квадратным.

Как можно решать такие уравнения, мы увидим в этой главе.

209. Нормальный вид квадратного уравнения. В квадратном уравнении (а также и в уравнениях более высоких степеней) принято, после упрощения уравнения, переносить все его члены в одну левую часть, так что правая часть уравнения делается равной нулю. Так, уравнение, составленное нами для решения предыдущей задачи, после указанного перенесения членов будет:

$$56x - 7x^2 + 63 = 0,$$

или после расположения членов по убывающим степеням буквы x:

$$-7x^2 + 56x + 63 = 0.$$

Числа -7, $+56$ и $+63$ называются коэффициентами этого квадратного уравнения; из них число $+63$ называется свободным членом, а числа -7 и $+56$ первым и вторым коэффициентами (мы предполагаем, что члены уравнения всегда расположены по убывающим степеням буквы x). Числа эти могут быть и положительные, и отрицательные, и даже нули (кроме первого коэффициента, который не может быть нулем, так как в противном случае уравнение не было бы квадратным). Если ни один из трех коэффициентов не равен нулю, то уравнение называется полным. Общий вид такого уравне- (нормальный вид) есть следующий:

$$ax^2 + bx + c = 0.$$

Заметим, что первый коэффициент a мы можем всегда сделать положительным, переменив в случае надобности перед всеми членами знаки на противоположные (другими словами, умножив обе части уравнения на -1). Так, приведенное выше уравнение мы можем написать так.

$$7x^2 - 56x - 63 = 0.$$

210. Решение неполных квадратных уравнений. Квадратное уравнение называется неполным, когда в нем нет члена, содержащего x в первой степени, или нет свободного члена; другими словами, когда второй коэффициент b равен нулю, или когда свободный член c равен 0. В первом случае уравнение имеет вид $ax^2 + c = 0$, во втором $ax^2 + bx = 0$ (может даже случиться, что одновременно и $b=0$ и $c=0$; тогда уравнение будет вида $ax^2=0$). Рассмотрим решение всех этих неполных уравнений.

I. Неполное квадратное уравнение вида $ax^2+c=0$.

Возьмем три следующих примера:

а) $3x^2-27=0$. Перенеся свободный член направо, получим: $3x^2=27$, и, следовательно, $x^2=\frac{27}{3}=9$. Значит, x есть квадратный корень из 9, т. е. число $+3$ или число -3. Условимся знаком $\sqrt{\ }$ обозначать арифметическое значение корня; тогда мы можем написать: $x=\pm\sqrt{9}=\pm 3$. Таким образом, данное уравнение имеет два решения. Обозначая одно из них x_1, а другое x_2, мы можем эти решения написать так:

$$x_1=+\sqrt{9}=+3; \qquad x_2=-\sqrt{9}=-3.$$

б) $2x^2-0{,}15=0$. Перенеся свободный член, получим:

$$2x^2=0{,}15 \text{ и } x^2=0{,}075.$$

Значит: $x=\pm\sqrt{0{,}075}$.

Найдем $\sqrt{0{,}075}$ с точностью, положим, до $\frac{1}{100}$ (§ 171):

$$\sqrt{0{,}07'50}=0{,}27$$

$$\begin{array}{r|l} \multicolumn{2}{c}{4} \\ 47 & 35'0 \\ 7 & 32\,9 \\ \cline{2-2} & 2\,1 \end{array}$$

Следовательно, $x_1=0{,}27\ldots$, $x_2=-0{,}27\ldots$

в) $2x^2+50=0$. Перенеся 50 направо, получим:

$$2x^2=-50;\ x^2=-\frac{50}{2}=-25;\ x=\pm\sqrt{-25}.$$

Так как из отрицательного числа нельзя извлечь квадратного корня, то данное уравнение не имеет решений (вещественных).

Таким образом, неполное квадратное уравнение вида $ax^2+c=0$ вообще решается так:

$$ax^2=-c;\ x^2=-\frac{c}{a};\ x=\pm\sqrt{-\frac{c}{a}}.$$

Если выражение $-\frac{c}{a}$ есть число положительное, то из него можно извлечь квадратный корень (точно или приближенно), и тогда для x получаем два значения с одинаковою абсолютною величиною, но одно положительное, другое отрицательное. Если же выражение $-\frac{c}{a}$ есть число отрицательное, то уравнение не имеет вещественных корней.

II. Неполное квадратное уравнение вида $ax^2+bx=0$.

Как частный пример возьмем уравнение $2x^2-7x=0$. В левой части этого уравнения вынесем x множителем за скобки:

$$x(2x-7)=0.$$

Теперь левая часть уравнения есть произведение, а правая равна нулю. Но произведение равняется нулю только тогда, когда какой-нибудь из сомножителей равен нулю; поэтому наше уравнение удовлетворяется только тогда, когда первый сомножитель x равен нулю или когда второй сомножитель $2x-7$ равен нулю (и когда, следовательно, $x={}^7/_2$). Значит, данное уравнение имеет два решения:

$$x_1=0 \text{ и } x_2=\frac{7}{2}=3\frac{1}{2}.$$

Таким образом, неполное квадратное уравнение вида $ax^2+bx=0$ решается вообще так.

$$ax^2+bx=0;\quad x(ax+b)=0;$$
$$x_1=0;\quad ax_2+b=0;\quad x_2=-\frac{b}{a}.$$

211. Двучлен второй степени. Если в неполных квадратных уравнениях возьмем левую часть независимо от правой, то получим выражение:

$$ax^2+c \text{ или } ax^2+bx.$$

Выражения эти называются двучленами второй степени относительно x. В них буква x означает переменное число, могущее принимать какие угодно значения, а буквы a, b и c означают какие-нибудь постоянные числа, как положительные, так и отрицательные; таковы, например, выражения: $3x^2-27$, $2x^2-0{,}15$, $2x^2+50$, x^2-8, $2x^2-7x, \ldots$ и т. п. Конечно, численная величина двучлена зависит от того значения, которое мы будем придавать переменному числу x; напр., двучлен $3x^2-27$ при $x=0$ будет -27, при $x=1$ он будет -24, при $x=2$ он окажется $3\cdot2^2-27=12-27=-15$, при $x=5$ получим $3\cdot5^2-$

$-27 = 75 - 27 = 48$... и т. п. Таким образом, двучлен 2-й степени от x представляет собою некоторую функцию от x.

Заметим, что между двучленом 2-й степени и левою частью неполного квадратного уравнения та существенная разница, что буква x в уравнении означает только то число, при котором двучлен, стоящий в левой части уравнения, равен нулю, тогда как в двучлене, взятом независимо от уравнения, буква x означает всякие числа, и, следовательно, двучлен может получать разнообразные значения.

То число, которое, будучи подставлено в двучлен на место x, обращает этот двучлен в нуль, называется корнем двучлена; значит, корень двучлена есть в то же время и корень того неполного квадратного уравнения, которое получится, если этот двучлен приравняем *нулю*.

212. График двучлена второй степени. Чтобы наглядно представить себе, как изменяется двучлен 2-й степени при изменении переменного числа x, мы построим его график так же, как прежде мы строили график двучлена 1-й степени (§ 115), или график функции $y = ax^2$ (т. е. график одночлена 2-й степени, § 159).

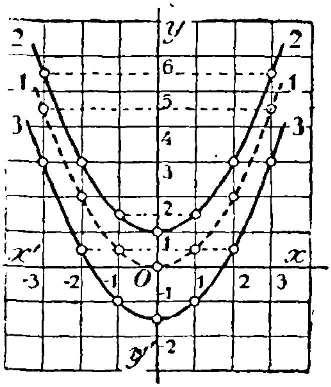
Рассмотрим совместно следующие три функции:

$$1)\ y = \frac{1}{2}x^2;\quad 2)\ y = \frac{1}{2}x^2 + 1;\quad 3)\ y = \frac{1}{2}x^2 - 1\frac{1}{2}.$$

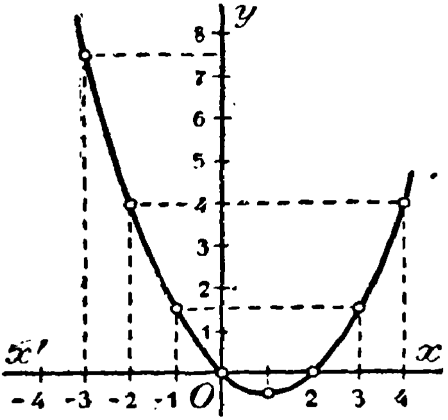
Составим таблицу их частных значений, напр., такую:

x	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	...
$y = {}^1/_2 x^2$ . . .	$4^1/_2$	2	$^1/_2$	0	$^1/_2$	2	$4^1/_2$	8	...
$y = {}^1/_2 x^2 + 1$.	$5^1/_2$	3	$1^1/_2$	1	$1^1/_2$	3	$5^1/_2$	9	...
$y = {}^1/_2 x^2 - 1^1/_2$	3	$^1/_2$	-1	$-1^1/_2$	-1	$^1/_2$	3	$6^1/_2$	...

Теперь, при помощи координатных осей и произвольной единицы длины, нанесем все эти значения на чертеж в виде точек и через полученные точки проведем кривые линии. Первая из этих линий (чертеж 47, прерывистая линия) есть парабола, которую мы чертили раньше (§ 158); она проходит через начало координат. Кривые 2-я и 3-я через точку O не проходят. Сравнивая все три кривые между собою, замечаем, что при одной и той же абсциссе x ордината 2-й кривой больше на 1, а ордината 3-й кривой меньше на $1^1/_2$ единицы, сравнительно с ординатой параболы 1-й. Поэтому можно сказать, что 2-я кривая есть та же парабола 1-я, только перемещенная параллельным перенесением[1]) на одну единицу вверх, а 3-я кривая есть парабола 1-я, перемещенная параллельным перенесением на $1^1/_2$ единицы вниз. Вообще кривая, выражающая функцию $y = ax^2 + c$, есть парабола $y = ax^2$, перемещенная параллельным



Черт. 47.



Черт. 48.

перенесением на c единиц вверх, если $c > 0$, и вниз, если $c < 0$. Ветви этой параболы направлены вверх, когда коэффициент при x есть число положительное (как в наших примерах), и вниз, когда этот коэффициент есть число отрицательное. В первом случае функция имеет наименьшее значение, во втором случае — наибольшее; и то и другое имеет место при $x = 0$ и равно свободному числу c.

Изобразим еще график двучлена

$$y = \frac{1}{2}x^2 - x,$$

ставляющего частный случай двучлена вида $y = ax^2 + bx$.

x	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	...
y	$7^1/_2$	4	$1^1/_2$	0	$-^1/_2$	0	$1^1/_2$	4	...

---

[1]) Когда какая-нибудь неизменяющаяся геометрическая фигура перемещается таким образом, что все ее точки движутся по прямым, параллельным между собой, то такое перемещение называется **параллельным перенесением**.

Особенность этой кривой состоит в том, что она проходит через точку (0,0), т. е. через начало координат (черт. 48).

213. Корни неполных квадратных уравнений в графическом изображении. Из трех парабол, изображенных нами на черт. 47, одна (3-я) пересекается с осью x-ов в двух точках. Так как в этих точках ординаты равны нулю, и они выражают значения данного двучлена, то, значит, абсциссы точек пересечения будут корни уравнения $\frac{1}{2}x^2 - 1\frac{1}{2} = 0$. На нашем чертеже мы можем только усмотреть, что эти корни одинаковы по абсолютной величине, но противоположны по знаку, и что абсолютная величина каждого корня превосходит $1\frac{1}{2}$ единицы. Если бы мы исполнили чертеж возможно точнее (напр. на миллиметровой бумаге, взяв за единицу длины сантиметр), то на чертеже мы могли бы точнее найти величину корней (приблизительно они равны $\pm 1{,}7$). Парабола 2-я не пересекается с осью x-ов. Значит, уравнение $\frac{1}{2}x^2 + 1 = 0$ не имеет корней.

Из черт. 48 видно, что уравнение $\frac{1}{2}x^2 - x = 0$ имеет два корня, из которых один есть 0.

214. Примеры решения полных квадратных уравнений. Для первого примера возьмем то квадратное уравнение, которое было составлено для задачи § 208:

$$7x^2 - 56x - 63 = 0.$$

Разделим все его члены на 7 и перенесем свободный член направо:

$$x^2 - 8x = 9.$$

Зададимся теперь вопросом, нельзя ли к двучлену $x^2 - 8x$ приложить такой третий член, чтобы образовался трехчлен, представляющий собою полный квадрат. Мы легко ответим на этот вопрос, если изобразим двучлен так:

$$x^2 - 2x \cdot 4.$$

Теперь ясно, что если этот двучлен дополним членом 4^2, то получим трехчлен

$$x^2 - 2x \cdot 4 + 4^2,$$

равный квадрату разности $x - 4$. Но если к левой части уравнения мы добавим число 4^2 (т. е. 16), то и к правой части должны добавить то же самое число. Сделав это, получим:

$$x^2 - 8x + 16 = 9 + 16, \text{ т. е. } (x - 4)^2 = 25,$$

Таким образом, разность $x-4$ есть такое число, квадрат которого равен 25; значит, эта разность должна равняться квадратному корню из 25, т. е. числу 5 или числу -5

$$x-4=+\sqrt{25}=+5, \text{ или } x-4=-\sqrt{25}=-5.$$

Перенеся теперь член -4 в правую часть, найдем два решения:

$$x_1=4+5=9 \text{ и } x_2=4-5=-1.$$

Оба эти решения годны для данного уравнения (в чем можно бедиться поверкою), но для задачи, из которой выведено ураение, отрицательное решение -1 не годится, так как в заache отыскивается абсолютная величина скорости, а не ее наравление.

Для второго примера возьмем уравнение.

$$3x^2+15x-7=0.$$

Разделим все члены на 3 и перенесем свободный член направо:

$$x^2+5x=\frac{7}{3}.$$

Из двучлена x^2+5x можно сделать квадрат суммы, если добавим к нему третий член $(^5/_2)^2$. Приложив этот член к обеим частям уравнения, получим:

$$x^2+5x+\left(\frac{5}{2}\right)^2=\left(\frac{5}{2}\right)^2+\frac{7}{3},$$

$$\left(x+\frac{5}{2}\right)^2=\frac{25}{4}+\frac{7}{3}=\frac{75+28}{12}=\frac{103}{12}.$$

Отсюда видно, что $x+\frac{5}{2}=\pm\sqrt{\frac{103}{12}}$, следовательно:

$$x_1=-\frac{5}{2}+\sqrt{\frac{103}{12}};\quad x_2=-\frac{5}{2}-\sqrt{\frac{103}{12}}.$$

Вычислим $\frac{103}{12}$ с точностью, положим, до $\frac{1}{10}$:

$$\sqrt{\frac{103}{12}}=\sqrt{8{,}58\ldots}=2{,}9\ldots$$

Следовательно:

$$x_1=-2{,}5+2{,}9\ldots=0{,}4\ldots;\quad x_2=-2{,}5-2{,}9\ldots=-5{,}4\ldots$$

215. Формула корней приведенного квадратного уравнения. Квадратное уравнение, у которого первый коэффициент есть $+1$, называется приведенным уравнением. К такому виду, как мы видели сейчас на примерах, уравнение может быть приведено и в том случае, когда первый коэффициент не 1; стоит только все члены уравнения разделить на этот коэффициент. В общем виде приведенное уравнение обыкновенно изображается так:

$$x^2 + px + q = 0.$$

Решим это буквенное уравнение, проделав над ним те же преобразования, которые были указаны на частных примерах.

Перенесем свободный член в правую часть:

$$x^2 + px = -q.$$

Так как $px = 2x \cdot \frac{p}{2}$, то, желая обратить двучлен $x + px$ в полный квадрат, прибавим к обеим частям уравнения по $\left(\frac{p}{2}\right)^2$:

$$x^2 + px + \left(\frac{p}{2}\right)^2 = -q + \left(\frac{p}{2}\right)^2.$$

Теперь уравнение можно представить так:

$$\left(x + \frac{p}{2}\right)^2 = \left(\frac{p}{2}\right)^2 - q,$$

откуда находим:

$$x + \frac{p}{2} = \pm\sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}$$

и

$$x = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}.$$

Формулу эту можно высказать так: *неизвестное приведенного квадратного уравнения равно половине второго коэффициента, взятого с противоположным знаком, плюс-минус корень квадратный из квадрата этой половины без свободного члена.*

Формулу эту надо запомнить и в буквенном выражении и в словесном.

Примеры.

1) $x^2 - x - 6 = 0$. Чтобы уравнение это уподобить буквенному $x^2 + px + q = 0$, представим его так: $x^2 + (-1)x + (-6) = 0$. Теперь видно, что в этом примере $p = -1$ и $q = -6$; поэтому:

$$x = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} + 6} = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{25}{4}} = \frac{1}{2} \pm \frac{5}{2};$$

$$x_1 = \frac{1}{2} + \frac{5}{2} = 3; \qquad x_2 = \frac{1}{2} - \frac{5}{2} = -2.$$

Поверка: $3^2 - 3 - 6 = 0$; $(-2)^2 - (-2) - 6 = 0$.

2) $x^2 - 18x + 81 = 0$; здесь $p = -18$, $q = +81$; поэтому:

$$x = 9 \pm \sqrt{81 - 81} = 9 \pm 0 = 9.$$

Уравнение имеет только один корень.

3) $x^2-2x+5=0$; $x=1\pm\sqrt{1-5}=1\pm\sqrt{-4}$. Корни мнимые.

Из этих примеров мы видим, что если $\left(\frac{p}{2}\right)^2-q>0$, то уравнение имеет 2 различных решения; если $\left(\frac{p}{2}\right)^2-q=0$, то уравнение имеет одно решение; наконец, если $\left(\frac{p}{2}\right)^2-q<0$, то уравнение не имеет вовсе решений (вещественных).

216. Общая формула корней квадратного уравнения. Уравнение $ax^2+bx+c=0$ по разделении его членов на a приводится к приведенному уравнению:

$$x^2+\frac{b}{a}x+\frac{c}{a}=0.$$

Решив это уравнение по формуле приведенного уравнения, найдем:

$$x=-\frac{b}{2a}\pm\sqrt{\left(\frac{b}{2a}\right)^2-\frac{c}{a}}.$$

Выражение это можно упростить так:

$$x=-\frac{b}{2a}\pm\sqrt{\frac{b^2}{4a^2}-\frac{c}{a}}=-\frac{b}{2a}\pm\sqrt{\frac{b^2-4ac}{4a^2}}=$$

$$=-\frac{b}{2a}\pm\frac{\sqrt{b^2-4ac}}{2a}=\frac{-b\pm\sqrt{b^2-4ac}}{2a}.$$

В этом упрощенном виде формулу полезно запомнить, ее можно высказать так: *неизвестное полного квадратного уравнения равно дроби, у которой числитель есть второй коэффициент, взятый с противоположным знаком, плюс-минус корень квадратный из квадрата этого коэффициента без учетверенного произведения первого коэффициента на свободный член, а знаменатель есть удвоенный первый коэффициент*[1].

---

[1] Формулу эту можно вывести, и не прибегая к формуле приведенного уравнения, так: перенеся свободный член направо, умножим все члены на $4a$:

$$4a^2x^2+4abx=-4ac.$$

Прибавим к обеим частям уравнения по b^2:

$$4a^2x^2+4abx+b^2=b^2-4ac,$$

т. е.

$$(2ax+b)^2=b^2-4ac.$$

Откуда:

$$2ax+b=\pm\sqrt{b^2-4ac};\quad x=\frac{-b\pm\sqrt{b^2-4ac}}{2a}.$$

Эту формулу можно назвать общею, так как она годится и для приведенного уравнения (если положим $a=1$) и для неполных квадратных уравнений (если положим $b=0$ или $c=0$).

Из общей формулы видно, что если $b^2-4ac>0$, то уравнение имеет 2 различных решения; если $b^2-4ac=0$, то уравнение имеет одно решение, именно $-\frac{b}{2a}$; если же $b^2-4ac<0$, то уравнение не имеет ни одного решения (оба решения мнимые). Так, уравнение $3x^2+5x-6=0$ имеет 2 решения, так как $b^2-4ac=5^2-4\cdot 3(-6)=25+72>0$; уравнение $9x^2-6x+1=0$ имеет одно решение, так как $b^2-4ac=(-6)^2-4\cdot 9\cdot 1=36-36=0$; уравнение $3x^2-5x+6=0$ не имеет решений (вещественных), так как $b^2-4ac=(-5^2)-4\cdot 3\cdot 6=25-72<0$.

217. Упрощение формулы, когда b четное число. Общая формула упрощается, если b четное число. Так, положив $b=2k$, найдем:

$$x=\frac{-2k\pm\sqrt{4k^2-4ac}}{2a}=\frac{-2k\pm\sqrt{4(k^2-ac)}}{2a}=$$

$$=\frac{-2k\pm 2\sqrt{k^2-4ac}}{2a}=\frac{-k\pm\sqrt{k^2-ac}}{a}.$$

Эта формула отличается от общей отсутствием цифровых множителей 4 и 2.

218. Число корней квадратного уравнения. Мы видели, что квадратное уравнение имеет иногда два корня, иногда один, иногда ни одного (случай мнимых корней). Однако согласились приписывать квадратным уравнениям во всех случаях два корня, разумея при этом, что корни могут быть иногда равными, иногда мнимыми. Причина такого соглашения состоит в том, что формулы, выражающие мнимые корни, обладают теми же свойствами, какие принадлежат вещественным корням, стоит только, совершая действие над мнимыми числами, руководиться правилами, выведенными для вещественных чисел, принимая притом, что $(\sqrt{-a})^2=-a$. Точно так же, когда уравнение имеет один корень, мы можем, рассматривая этот корень как два одинаковых, приписать им те же свойства, какие принадлежат разным корням уравнения. Два из этих свойств мы сейчас укажем.

219. Два свойства корней квадратного уравнения. Если сложим две формулы, выражающие корни приведенного квадратного уравнения $x^2+px+q=0$:

$$x_1=-\frac{p}{2}+\sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2-q};\quad x_2=-\frac{p}{2}-\sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2-q},$$

то радикалы взаимно уничтожатся, и мы получим:

$$x_1+x_2=-\frac{p}{2}-\frac{p}{2}=-p.$$

Если же две формулы перемножим, то получим (произведение суммы двух чисел на их разность равно разности квадратов этих чисел):

$$x_1x_2=\left(-\frac{p}{2}\right)^2-\left(\sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2-q}\right)^2.$$

Каково бы ни было подкоренное число $\left(\frac{p}{2}\right)-q$, всегда

$$\left(\sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2-q}\right)^2=\left(\frac{p}{2}\right)^2-q.$$

Следовательно:

$$x_1x_2=\frac{p^2}{4}-\left(\frac{p^2}{4}-q\right)=q$$

Таким образом, *сумма корней приведенного квадратного уравнения равна второму коэффициенту, взятому с противоположным знаком, а произведение корней равно свободному члену.*

Следствия. 1) Пользуясь этими свойствами, мы легко можем *составить квадратное уравнение, у которого корнями были бы данные числа.* Пусть, напр., надо составить уравнение, у которого корни были бы числа 2 и 3; тогда из равенств $2+3=-p$ и $2\cdot 3=q$ находим: $p=-5$ и $q=6$; следовательно, уравнение будет: $x^2-5x+6=0$. Подобно этому найдем, что 3 и -7 будут корни уравнения $x^2-[3+(-7)]\,x+3\,(-7)=0$, т. е. $x^2+4x-21=0$; числа 3 и 0 будут корни уравнения $x^2-3x=0$, и т. п.

2) При помощи тех же свойств мы можем, не решая квадратного уравнения, *определить знаки его корней,* если эти корни вещественные. Пусть, напр., имеем уравнение $x^2+8x+12=0$. Так как в этом примере выражение $\left(\frac{p}{2}\right)^2-q$, т. е. 4^2-12, есть число положительное, то оба корня вещественные. Обращая внимание на свободный член, видим, что он имеет знак $+$; значит, произведение корней должно быть положительное число, т. е. оба корня имеют одинаковые знаки. Эти знаки должны быть минусы, так как сумма корней отрицательна (она равна -8). Уравнение $x^2+8x-12=0$ имеет корни с разными знаками (потому что их произведение отрицательно), причем отрицательный корень имеет бóльшую абсолютную величину (потому что их сумма отрицательна), и т. п.

3) Так как корни уравнения $ax^2+bx+c=0$ те же самые что и корни уравнения $x^2+\frac{b}{a}x+\frac{c}{a}=0$, то для такого уравнения сумма корней равна $-\frac{b}{a}$, а произведение их равно $\frac{c}{a}$ [1].

Глава вторая.

Трехчлен 2-й степени и его графическое изображение.

220. Трехчлен 2-й степени. Выражение вида ax^2+bx+c, в котором коэффициенты a, b, c означают какие угодно постоянные числа, а x — переменное число, называется трехчленом второй степени (относительно переменного x). Те значения x, при которых трехчлен обращается в нуль, называют его нулевыми значениями или корнями; конечно, эти корни те самые, которые принадлежат квадратному уравнению $ax^2+bx+c=0$, или — что все равно — приведенному уравнению $x^2+\frac{b}{a}x+\frac{c}{a}=0$. В частном случае при $a=1$ трехчлен принимает вид x^2+px+q; при $b=0$ или при $c=0$ трехчлен обращается в двучлен ax^2+c или ax^2+bx.

В этой главе мы рассмотрим некоторые свойства трехчлена и процесс его изменения при изменении числа x.

221. Разложение трехчлена x^2+px+q на множители 1-й степени относительно x. Покажем два способа такого разложения.

1-й способ: посредством введения двух вспомогательных членов.

Пусть требуется разложить трехчлен $x^2+5x-14$. Обращая внимание на первые два члена, замечаем, что если к ним добавить третий член, равный квадрату половины коэффициента при втором члене, т. е. член $(^5/_2)^2$, то из них составится трехчлен, равный $(x+{}^5/_2)^2$. Заметив это, приложим к данному трехчлену два взаимно уничтожающихся члена: $+(^5/_2)^2$ и $-(^5/_2)^2$, от чего, конечно, трехчлен не изменится. Тогда получим:

$$x^2+5x+\left(\frac{5}{2}\right)^2-\left(\frac{5}{2}\right)^2-14=\left(x+\frac{5}{2}\right)^2-\frac{25}{4}-14=\left(x+\frac{5}{2}\right)^2-\frac{81}{4}=$$
$$=\left(x+\frac{5}{2}\right)^2-\left(\frac{9}{2}\right)^2.$$

---

[1] Если квадратное уравнение имеет 2 одинаковых корня, то говорят, что оно имеет двукратный корень или двойной корень. В уравнениях более высоких степеней могут иногда встречаться трехкратные и вообще многократные корни. Напр., уравнение $(x-5)(x-2)^3=0$ имеет трехкратный корень $x=2$ и однократный $x=5$.

Мы привели данный трехчлен к такому виду, при котором он представляет собою разность двух квадратов; а такую разность можно разложить на два множителя: на сумму возвышаемых чисел и на их разность. Сделав такое разложение, получим:

$$\left(x+\frac{5}{2}+\frac{9}{2}\right)\left(x+\frac{5}{2}-\frac{9}{2}\right)=(x+7)\ (x-2).$$

Пусть еще требуется разложить трехчлен x^2-8x+5. Прибавим два вспомогательных члена $+4^2$ и -4^2:

$$x^2-8x+4^2-4^2+5.$$

Первые три члена составляют $(x-4)^2$, последние 2 члена дают число -11:

$$(x-4)^2-11.$$

Вместо 11 можно подставить $(\sqrt{11})^2$:

$$(x-4)^2-(\sqrt{11})^2.$$

Теперь эта разность квадратов разлагается так:

$$(x-4+\sqrt{11})\ (x-4-\sqrt{11}).$$

Если вычислим 11 с точностью, положим, до $\frac{1}{1000}$, то найдем: $\sqrt{11}=3{,}316\ldots$ Подставив, получим:

$$(x-0{,}683\ldots)\ (x-7{,}316\ldots).$$

Этот прием можно применить и к буквенному трехчлену x^2+px+q, а именно: введем два вспомогательных члена

$$+\left(\frac{p}{2}\right)^2 \text{ и } -\left(\frac{p}{2}\right)^2:$$

$$x^2+px+\left(\frac{p}{2}\right)^2-\left(\frac{p}{2}\right)^2+q=\left(x+\frac{p}{2}\right)^2-\left[\left(\frac{p}{2}\right)^2-q\right].$$

Вместо разности $\left(\frac{p}{2}\right)^2-q$ мы можем подставить выражение $\left(\sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2-q}\right)^2$:

$$\left(x+\frac{p}{2}\right)^2-\left(\sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2-q}\right)^2.$$

Эту разность квадратов разлагаем на 2 множителя:

$$\left[x+\frac{p}{2}+\sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2-q}\right]\left[x+\frac{p}{2}-\sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2-q}\right].$$

2-й способ: посредством предварительного нахождения корней трехчлена.

Найдем корни трехчлена, решив квадратное уравнение: $x^2 + px + q = 0$. Пусть эти корни будут x_1 и x_2. Тогда, как мы видели (§ 219):

$$x_1 + x_2 = -p \text{ и } x_1x_2 = q.$$

Из этих равенств находим:

$$p = -(x_1 + x_2) \text{ и } q = x_1x_2.$$

Подставим в трехчлен на место p и q эти выражения и затем преобразуем полученный многочлен:

$$x^2 + px + q = x^2 - (x_1 + x_2)x + x_1x_2 = x^2 - x_1x - x_2x + x_1x_2 =$$
$$= (x^2 - x_1x) - (x_2x - x_1x_2) = x(x - x_1) - x_2(x - x_1) =$$
$$= (x - x_1)(x - x_2).$$

Мы видим таким образом, что *трехчлен $x^2 + px + q$ разлагается на два множителя, из которых первый равен разности между x и одним корнем трехчлена, а второй равен разности между x и другим корнем трехчлена.*

Применив этот способ к примерам, разобранным сейчас первым способом, мы придем к тем же разложениям:

1) $x^2 + 5x - 14 = 0$; $x = -\frac{5}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{5}{2}\right)^2 + 14} = -\frac{5}{2} \pm \sqrt{\frac{81}{4}}$;

$$x_1 = -\frac{5}{2} + \frac{9}{2} = 2; \quad x_2 = -\frac{5}{2} - \frac{9}{2} = -7.$$

$$x^2 + 5x - 14 = (x - 2)\,[x - (-7)] = (x - 2)(x + 7).$$

2) $x^2 - 8x + 5 = 0$, $\quad x = 4 \pm \sqrt{16 - 5} = 4 \pm \sqrt{11}$;

$$x_1 = 4 + \sqrt{11}; \quad x_2 = 4 - \sqrt{11}.$$

$$x^2 - 8x + 5 = [x - (4 + \sqrt{11})]\,[x - (4 - \sqrt{11})] =$$
$$= (x - 4 - \sqrt{11})(x - 4 + \sqrt{11}).$$

3) $x^2 + px + q = 0$; $x = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}$;

$$x_1 = -\frac{p}{2} + \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}; \quad x_2 = -\frac{p}{2} - \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q};$$

$$x^2 + px + q = \left[x - \left(-\frac{p}{2} + \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}\right)\right]\left[x - \left(-\frac{p}{2} - \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}\right)\right] =$$
$$= \left(x + \frac{p}{2} - \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}\right)\left(x + \frac{p}{2} + \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}\right).$$

222. Разложение трехчлена ax^2+bx+c. Такой трехчлен прежде всего можно представить так:

$$ax^2+bx+c=a\left(x^2+\frac{b}{a}x+\frac{c}{a}\right).$$

Выражение, стоящее внутри скобок, есть трехчлен вида x^2+px+q. Его корни x_1 и x_2 будут те же самые, что и трехчлена ax^2+bx+c. Найдя их, можем, по доказанному в предыдущем параграфе, разложить этот трехчлен так:

$$x^2+\frac{b}{a}x+\frac{c}{a}=(x-x_1)\ (x-x_2).$$

Следовательно:

$$ax^2+bx+c=a\ (x-x_1)\ (x-x_2).$$

Таким образом, разложение трехчлена ax^2+bx+c отличается от разложения трехчлена x^2+px+q только дополнительным множителем a.

Примеры. 1) Трехчлен $2x^2-2x-12$, у которого корни 3 и -2, можно разложить так:

$$2\,(x-3)\ (x+2).$$

2) $(a^2-1)\,(b^2+1)-2b\,(a^2+1)$. Заметив, что данное выражение есть трехчлен второй степени относительно буквы b, расположим его по степеням этой буквы:

$$(a^2-1)\ b^2-2\ (a^2+1)\ b+(a^2-1).$$

Корни этого трехчлена (принимая b за переменное число) будут (§ 217):

$$b_1=\frac{a^2+1+\sqrt{(a^2+1)^2-(a^2-1)^2}}{a^2-1}=\frac{a^2+1+2a}{a^2-1}=\frac{a+1}{a-1},$$

$$b_2=\frac{a^2+1-\sqrt{(a^2+1)^2-(a^2-1)^2}}{a^2-1}=\frac{a^2+1-2a}{a^2-1}=\frac{a-1}{a+1}.$$

Следовательно, данный трехчлен представится так:

$$(a^2-1)\left(b-\frac{a+1}{a-1}\right)\left(b-\frac{a-1}{a+1}\right)=[b\,(a-1)-(a+1)][b\,(a+1)-(a-1)]=$$

$$=(ab-b-a-1)\,(ab+b-a+1).$$

223. Следствие. *По данным корням можно составить квадратное уравнение* (иначе, чем это указано в § 219). Так, уравнение, имеющее корни 3 и -2, будет $(x-3)[x-(-2)]=0$, т. е. $(x-3)(x+2)=0$, что по раскрытии скобок дает: $x^2-x-6=0$. Конечно, все члены этого уравнения можно умножить на произвольное число, не зависящее от x (напр. на 2), от чего корни не изменятся.

224. График трехчлена второй степени. Сначала мы рассмотрим график такого трехчлена, который может быть представлен в виде произведения $a(x+m)^2$. Напр., возьмем такие две функции:

$$1)\ y=\frac{1}{4}(x+2)^2 \text{ и } 2)\ y=\frac{1}{4}(x-2)^2.$$

Для сравнения мы изобразим на том же чертеже еще параболу:

$$3)\ y=\frac{1}{4}x^2.$$

Предварительно составим таблицу частных значений этих трех функций, напр. такую:

$x=$	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
1) $y={}^1/_4(x+2)^2=$	$2^1/_4$	1	$^1/_4$	0	$^1/_4$	1	$2^1/_4$	4	$6^1/_4$	9	$12^1/_4$	1
2) $y={}^1/_4(x-2)^2=$	$12^1/_4$	9	$6^1/_4$	4	$2^1/_4$	1	$^1/_4$	0	$^1/_4$	1	$2^1/_4$	4
3) $y={}^1/_4x^2$	$6^1/_4$	4	$2^1/_4$	1	$^1/_4$	0	$^1/_4$	1	$2^1/_4$	4	$6^1/_4$	9

Нанеся все эти значения на чертеж, получим три графика, изображенные на черт. 49.

Рассматривая этот чертеж, мы замечаем, что кривая 1-я есть та же парабола 3-я, только перенесенная на 2 единицы влево, а кривая 2-я есть та же парабола 3-я, но перенесенная на 2 единицы вправо.

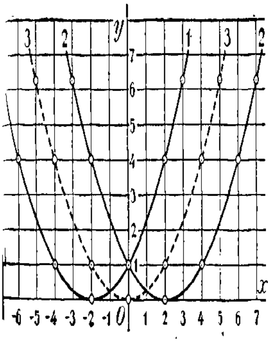
Обобщая этот вывод, можем сказать, что график функции $y=a(x+m)^2$ есть парабола, выражающая функцию $y=ax^2$, только парабола эта перенесена **влево**, если $m>0$, и **вправо**, если $m<0$, на столько единиц, сколько их заключается в абсолютной величине числа m. Ветви этой параболы направлены вверх, если $a>0$ (как в наших примерах), и вниз, если $a<0$ (напр., если бы было задано: $y=-{}^1/_4(x+2)^2$.

Теперь возьмем трехчлен вида: $y=ax^2+bx+c$, напр. такой частный случай:

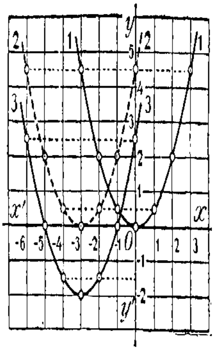
$$y=\frac{1}{2}x^2+3x+2\frac{1}{2}$$

x	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	...
y	$2^1/_2$	0	$-1^1/_2$	-2	$-1^1/_2$	0	$2^1/_2$	6	...

Построив точки, выражающие эти значения, и проведя через них кривую (кривая 3-я, черт. 50), мы получим искомый график. Покажем теперь, что этот график есть та же парабола, которая выражает функцию $y={}^1/_2x^2$ (полученную отбрасыванием в данном трехчлене второго и третьего членов), только парабола эта перенесена в другое место. Для этого преобразуем данный трехчлен следующим образом: во-первых, вынесем за скобки коэффициент при x^2:



Черт. 49.



Черт. 50.

$$y=\frac{1}{2}x^2+3x+2\frac{1}{2}=\frac{1}{2}(x^2+6x+5);$$

во-вторых, к трехчлену, стоящему в скобках, добавим два взаимно-уничтожающихся члена: $+3^2$ и -3^2 (как мы бы сделали, если бы хотели разложить этот трехчлен на множители способом введения двух вспомогательных членов):

$$y=\frac{1}{2}(x^2+6x+5+3^2-3^2);$$

и, в-третьих, сгруппируем члены многочлена в 2 группы так:

$$y=\frac{1}{2}[(x^2+6x+3^2)-(3^2-5)]=\frac{1}{2}[(x+3)^2-4]=\frac{1}{2}(x+3)^2-2.$$

Принимая теперь во внимание примеры,
предыдущих параграфах, мы можем поступить так:

Построим параболу, выражающую функцию: $y=\frac{1}{2}x^2$ (кривая 1-я, черт. 50); затем перенесем ее на 3 единицы влево, Тогда получим 2-ю параболу, выражающую функцию $y=\frac{1}{2}(x+3)^2$. Эту параболу перенесем теперь на 2 единицы вниз; тогда получим третью параболу, выражающую данную функцию.

Возьмем теперь трехчлен в общем виде:

$$y=ax^2+bx+c$$

и преобразуем его так, как было сейчас указано на частном примере:

$$y=a\left(x^2+\frac{b}{a}x+\frac{c}{a}\right)=a\left[x^2+\frac{b}{a}x+\frac{c}{a}+\left(\frac{b}{2a}\right)^2-\left(\frac{b}{2a}\right)^2\right]=$$

$$=a\left\{\left[x^2+\frac{b}{a}x+\left(\frac{b}{2a}\right)^2\right]-\left[\left(\frac{b}{2a}\right)^2-\frac{c}{a}\right]\right\}=$$

$$=a\left[\left(x+\frac{b}{2a}\right)^2-\frac{b^2-4ac}{4a^2}\right]=a\left(x+\frac{b}{2a}\right)^2-\frac{b^2-4ac}{4a}.$$

Теперь мы можем утверждать, что график трехчлена $y=ax^2+bx+c$ есть парабола $y=ax^2$, перемещенная двойным параллельным перенесением:

во-первых, параллельно оси x-ов на столько единиц, сколько их есть в абсолютной величине числа $\frac{b}{2a}$, влево, если это число положительное, и вправо, если оно отрицательное;

во-вторых, параллельно оси y-ов на столько единиц, сколько их есть в абсолютной величине числа $-\frac{b^2-4ac}{4a}$, вверх, если это число положительное, и вниз, если оно отрицательное.

225. Замечание. Когда в трехчлене коэффициент при x^2 есть число положительное (как в примере предыдущего параграфа), тогда ветви параболы направлены вверх. Если же этот коэффициент число отрицательное, то ветви параболы должны быть направлены вниз. Так, если возьмем:

$$y=-\frac{1}{2}x^2-3x-2\frac{1}{2},$$

то, вынеся знак — за скобки, мы получим:

$$y=-\left(\frac{1}{2}x^2+3x+2\frac{1}{2}\right).$$

Сравнивая эту функцию с той, которую мы изобразили графи-
параграфе, мы замечаем, что при одинаковых
функции должны

ней функции,
получится такая же парабола,
но расположенная ветвями вниз, а вершиной вверх, [illegible]
с параболой 3-й этого чертежа.

226. Графическое решение полного квадратного уравнения.

Квадратное уравнение можно графически решить таким способом. Построив на миллиметровой бумаге параболу, выражающую трехчлен, стоящий в левой части уравнения, находим точки пересечения этой параболы с осью x-ов (если такие точки существуют). Абсциссы этих точек и будут корни уравнения, так как при этих абсциссах ординаты, выражающие соответствующие значения трехчлена, равны нулю.

Примеры.

1) $\frac{1}{2}x^2+3x+2\frac{1}{2}=0$. График левой части этого уравнения изображен кривой 3-й, на черт. 50. На нем мы видим, что парабола пересекается с осью x-ов в двух точках, абсциссы которых -1 и -5. Это и будут корни уравнения. Это можно проверить, решив уравнение посредством общей формулы.

2) $\frac{1}{2}x^2-2x+2=0$. Составив таблицу частных значений трехчлена $y=\frac{1}{2}x^2-2x+2$:

x	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	...
y	8	$4\frac{1}{2}$	2	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	2	$4\frac{1}{2}$	8	...

ы построим параболу (черт. 51). Эта парабола не пересекается осью x-ов, а только ее касается в точке с абсциссой 2. Уравнение в этом случае имеет только один корень 2.

3) $x^2-x+2=0$.

x	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	...
y	14	8	4	2	2	4	8	14	...

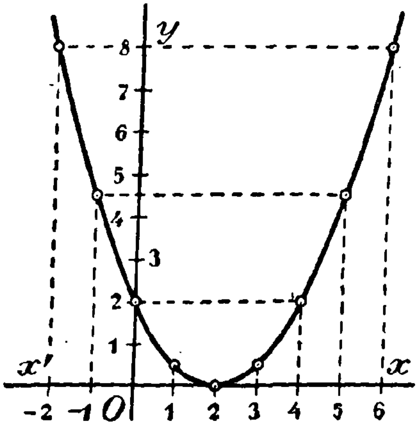
Парабола (черт. 52) не пересекается и не касается оси x уравнение не имеет вещественных корней.

Укажем еще *другой прием*, более удобный для выполнения. Пусть требуется решить уравнение:

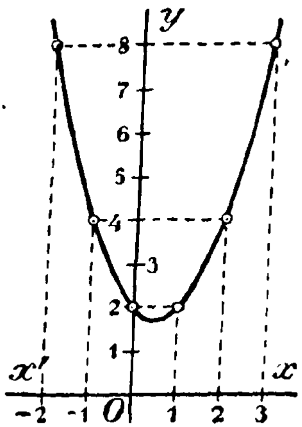
$$x^2 - 1{,}5x - 2 = 0,$$

которое можно изобразить так:

$$x^2 = 1{,}5x + 2.$$



Черт. 51.



Черт. 52.

Каждая часть этого уравнения, рассматриваемая отдельно, есть некоторая функция от x. Обозначим функцию, выражаемую левою частью уравнения, буквою y_1 и функцию, выражаемую правой частью, буквой y_2:

$$y_1 = x^2; \qquad y_2 = 1{,}5x + 2.$$

Первая функция на чертеже выражается параболой, вторая — прямой линией. Построив на одном и том же чертеже параболу и прямую по их частным значениям:

$y_1 = x^2$

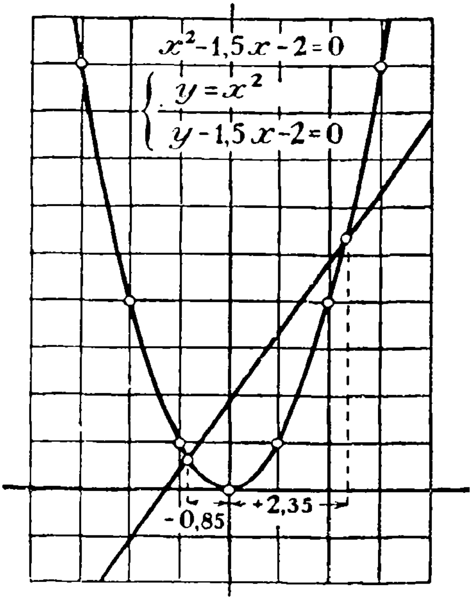
x	-3	-2	-1	0	1	2	3	. . .
y_1	9	4	1	0	1	4	9	. . .

$y_2 = 1{,}5x + 2$

x	0	2
y_2	2	5

мы найдем (черт. 53), что прямая и парабола пересекаются в двух точках, абсциссы которых приблизительно выражаются числами 2,35 и —0,85. Это и будут приближенные значения корней данного уравнения, так как при каждой из этих абсцисс ординаты y_1, y_2 равны между собой, и следовательно:

$$x^2 = 1{,}5x + 2.$$



Черт. 53.

Если случится, что прямая с параболой не пересекается, то уравнение не имеет вещественных корней; если же прямая коснется параболы, то уравнение имеет один корень, равный абсциссе точки касания.

Замечание. Так как вычерчивание параболы очень часто требуется для графического решения квадратных уравнений, то для сокращения чертежной работы лучше всего заранее начертить возможно точнее параболу на картоне и из него вырезать параболическое лекало, которым можно пользоваться во многих случаях. На таком лекале надо надписать, какая единица длины была взята при вычерчивании параболы (напр. „за единицу принят 1 *см*“).

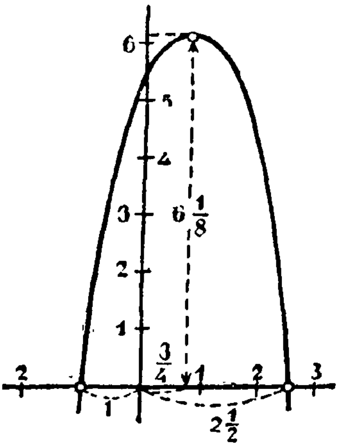
227. Наибольшее и наименьшее значение трехчлена. Когда ветви параболы, изображающей трехчлен $y = ax^2 + bx + c$, направлены вверх ($a > 0$), тогда из всех ординат есть одна наименьшая; наибольшей ординаты в этом случае нет. Наоборот, когда ветви направлены вниз ($a < 0$), тогда из всех ординат есть одна наибольшая; наименьшей ординаты в этом случае нет. Значит, *трехчлен* $y = ax^2 + bx + c$ *при* $a > 0$ *имеет наименьшее значение, не имея наибольшего*; *при* $a < 0$ *имеет наибольшее значение, не имея наименьшего.*

Чтобы найти величину наибольшего или наименьшего значений, преобразуем трехчлен так, как мы это делали раньше (§ 224).

$$ax^2 + bx + c = a\left(x + \frac{b}{2a}\right)^2 - \frac{b^2 - 4ac}{4a}.$$

В таком виде трехчлен представляет собой алгебраическую сумму двух слагаемых: переменного слагаемого $a\left(x+\frac{b}{2a}\right)^2$ и постоянного $-\frac{b^2-4ac}{4a}$. Если $a>0$, то первое слагаемое при $x=-\frac{b}{2a}$ равно нулю, а при всех прочих значениях x оно есть число положительное. Значит, при $x=-\frac{b}{2a}$ трехчлен имеет наименьшее значение, именно $-\frac{b^2-4ac}{4a}$. Если же $a<0$, то первое слагаемое при $x=-\frac{b}{2a}$ попрежнему равно нулю, а при всех прочих значениях x оно есть число отрицательное; следовательно, трехчлен при $x=-\frac{b}{2a}$ получает теперь наибольшее значение, именно $-\frac{b^2-4ac}{4a}$ (вспомним, что нуль больше всякого отрицательного числа).

228_1. Изменение трехчлена при изменении x. Изобразив данный трехчлен графически, мы тем самым наглядно представим процесс его изменения при изменении числа x. Возьмем, напр., черт. 50, изображающий трехчлен $\frac{1}{2}x^2+3x+2\frac{1}{2}$. Из него видно, что когда x возрастает от $-\infty$ до -3, трехчлен убывает от $+\infty$ до наименьшего значения -2, переходя при этом через нулевое значение при $x=-5$. При дальнейшем возрастании x от -3 до $+\infty$ трехчлен возрастает от -2 до $+\infty$, переходя при этом через нуль при $x=-1$. Из чертежа видно также, что $\frac{1}{2}x^2+3x+2\frac{1}{2}>0$ при всех значениях x, меньших -5, и при всех значениях x, больших -1; наоборот, $\frac{1}{2}x^2+3x+2\frac{1}{2}<0$ при всех значениях x, заключающихся между -5 и -1.



Черт. 51.

Впрочем, чтобы наглядно представить себе процесс изменения данного трехчлена, нет надобности составлять таблицу его частных значений и по ней подробно строить график трехчлена. Пусть, напр., надо проследить изменение трехчлена:

$$y=-2x^2+3x+5.$$

Для этого можно поступить так: обращая внимание на коэффициент при x^2, видим, что он отрицательный. Из этого заключаем, что ветви параболы должны быть направлены вниз, и потому трехчлен имеет наибольшее значение, не имея наименьшего. Найдем корни трехчлена, для чего надо решить уравнение:

$$-2x^2+3x+5=0,\quad \text{или}\quad 2x^2-3x-5=0,$$

$$x=\frac{3\pm\sqrt{3^2+4\cdot2\cdot5}}{2\cdot2}=\frac{3\pm\sqrt{49}}{4}=\frac{3\pm7}{4};$$

$$x_1=2^1/_2,\qquad x_2=-1.$$

Трехчлен имеет два корня, и потому парабола, изображающая его, должна пересекаться два раза с осью x-ов.

Найдем еще величину наибольшего значения трехчлена. Для этого преобразуем его так, как мы раньше (§ 224) преобразовывали трехчлен $^1/_2x^2+3x+2^1/_2$, а именно так:

$$-2x^2+3x+5=-2\left(x^2-\frac{3}{2}x-\frac{5}{2}\right)=$$

$$=-2\left[x^2-\frac{3}{2}x-\frac{5}{2}+\left(\frac{3}{4}\right)^2-\left(\frac{3}{4}\right)^2\right]=-2\left[\left(x-\frac{3}{4}\right)^2-\frac{5}{2}-\frac{9}{16}\right]=$$

$$=-2\left[\left(x-\frac{3}{4}\right)^2-\frac{49}{16}\right]=-2\left(x-\frac{3}{4}\right)^2+\frac{49}{8}.$$

Так как произведение $-2(x-{}^3/_4)^2$ при $x={}^3/_4$ равно 0, а при всех прочих значениях x оно есть число отрицательное, то при $x={}^3/_4$ значение трехчлена равно $^{49}/_8$, а при всех других значениях оно будет меньше этой дроби. Значит, $^{49}/_8=6^1/_8$ есть наибольшее значение данного трехчлена (при $x={}^3/_4$). Таким образом, график трехчлена изобразится так, как на черт. 54. Хотя этот чертеж и приблизительный, тем не менее он наглядно изображает процесс изменения данного трехчлена, а именно, из чертежа видно, что при возрастании x от $-\infty$ до -1 трехчлен возрастает от $-\infty$ до 0; затем при возрастании x от -1 до $^3/_4$ трехчлен продолжает возрастать до $6^1/_8$, а при дальнейшем возрастании x от $^3/_4$ до $+\infty$ трехчлен убывает, переходя во второй раз через нуль при $x=2^1/_2$.

228_2. Решение неравенства второй степени с одним неизвестным.

Общий вид такого неравенства, по упрощении его, есть следующий:

$$ax^2+bx+c\gtreqless0.$$

Так как знак $<$ всегда может быть приведен к знаку $>$ (умн жением обеих частей неравенства на -1), то достаточно ра смотреть неравенства вида:

$$ax^2+bx+c>0,$$

в котором число a может быть и положительным и отрицательным.

Решение этого неравенства основано на свойстве трехчлена ax^2+bx+c разлагаться на множителей первой степени относительно x (§ 221). Обозначив буквами α и β корни этого трехчлена, мы можем заменить его произведением $a(x-\alpha)(x-\beta)$, и тогда неравенство можно написать так:

$$a(x-\alpha)(x-\beta)>0.$$

Рассмотрим отдельно три следующих случая:

I. Корни вещественные неравные (что бывает тогда, когда $b^2-4ac>0$, § 216). Пусть $\alpha>\beta$. Если $a>0$, то произведение $a(x-\alpha)(x-\beta)$, очевидно, тогда положительно, когда каждая из разностей $x-\alpha$ и $x-\beta$ положительна или каждая отрицательна. Для этого достаточно, чтобы x было больше α (тогда подавно x больше β), или же чтобы x было меньше β (тогда подавно x меньше α). Следовательно, в этом случае неравенство получает решение при $x>\alpha$ и также при $x<\beta$, т. е. x должно быть или больше большего корня или меньше меньшего корня.

Если же $a<0$, то произведение $a(x-\alpha)(x-\beta)$ тогда положительно, когда одна из разностей $x-\alpha$ и $x-\beta$ отрицательна, а другая положительна. Для этого достаточно, чтобы x удовлетворяло неравенствам $\beta<x<\alpha$, т. е. чтобы x заключалось между корнями трехчлена.

II. Корни вещественные равные (что бывает тогда, когда $b^2-4ac=0$). Если $\alpha=\beta$, то неравенство принимает вид:

$$a(x-\alpha)^2>0.$$

Так как при всяком вещественном значении x, не равном α, число $(x-\alpha)^2$ положительно, то при $a>0$ неравенство удовлетворяется всевозможными вещественными значениями x, за исключением $x=\alpha$, а при $a<0$ это неравенство невозможно.

III. Корни мнимые (что бывает тогда, когда $b^2-4ac<0$)

Пусть $\alpha=m+\sqrt{-n}$; в таком случае $\beta=m-\sqrt{-n}$.

Тогда

$$x - \alpha = x - (m + \sqrt{-n}) = (x - m) - \sqrt{-n};$$
$$x - \beta = x - (m - \sqrt{-n}) = (x - m) + \sqrt{-n}.$$

Следовательно,

$$a(x - \alpha)(x - \beta) = a\,[(x - m)^2 - (\sqrt{-n})^2] = a[(x - m)^2 + n],$$

и неравенство можно написать так: $a[(x - m)^2 + n] > 0$. Так как сумма $(x - m)^2 + n$ при всяком вещественном значении x есть число положительное, то при $a > 0$ неравенство удовлетворяется всевозможными значениями x, а при $a < 0$ оно невозможно.

Примеры. 1) Решить неравенство: $x^2 + 3x - 28 > 0$.

Корни трехчлена: $\alpha = 4$, $\beta = -7$. Следовательно, неравенство можно написать так:

$$(x - 4)\,[x - (-7)] > 0.$$

Отсюда видно, что $x > 4$ или $x < -7$.

2) Решить неравенство: $4x^2 - 28x + 49 > 0$.

Корни суть: $\alpha = \beta = 3^1/_2$.

Поэтому

$$4(x - 3^1/_2)^2 > 0,$$

откуда видно, что неравенство невозможно.

3) Решить неравенство: $x^2 - 4x + 7 > 0$.

Корни суть: $\alpha = 2 + \sqrt{-3}$; $\beta = 2 - \sqrt{-3}$; поэтому неравенство можно написать так: $(x - 2)^2 + 3 > 0$. Отсюда видно, что оно удовлетворяется всевозможными вещественными значениями x.

Глава третья.

Биквадратное уравнение и некоторые другие.

229. Биквадратное уравнение. Уравнение 4-й степени, напр. такое:

$$x^4 - 13x^2 + 36 = 0,$$

в которое входят только четные степени неизвестного, называется биквадратным. Оно приводится к квадратному, если заменим x^2 через y и, следовательно, x^4 через y^2; тогда уравнение обратится в квадратное:

$$y^2 - 13y + 36 = 0.$$

Решим его:

$$y=\frac{13}{2}\pm\sqrt{\frac{169}{4}-36}=\frac{13}{2}\pm\sqrt{\frac{25}{4}}=\frac{13}{2}\pm\frac{5}{2}.$$

$$y_1=\frac{13}{2}+\frac{5}{2}=9,\qquad y_2=\frac{13}{2}-\frac{5}{2}=4.$$

Но из равенства $x^2=y$ видно, что $x=\pm\sqrt{y}$. Подставляя сюда на место y найденные числа 9 и 4, получим следующие четыре решения данного уравнения:

$$x_1=+\sqrt{9}=3;\qquad x_2=-\sqrt{9}=-3;$$

$$x_3=+\sqrt{4}=2;\qquad x_4=-\sqrt{4}=-2.$$

Составим формулы для общего вида биквадратного уравнения: $ax^4+bx^2+c=0$. Положив $x^2=y$, получим уравнение $ay^2+by+c=0$, из которого находим:

$$y_1=\frac{-b+\sqrt{b^2-4ac}}{2a};\qquad y_2=\frac{-b-\sqrt{b^2-4ac}}{2a}.$$

Но так как $x=\pm\sqrt{y}$, то для биквадратного уравнения мы получим следующие 4 решения:

$$x_1=+\sqrt{\frac{-b+\sqrt{b^2-4ac}}{2a}},\qquad x_2=-\sqrt{\frac{-b+\sqrt{b^2-4ac}}{2a}},$$

$$x_3=+\sqrt{\frac{-b-\sqrt{b^2-4ac}}{2a}},\qquad x_4=-\sqrt{\frac{-b-\sqrt{b^2-4ac}}{2a}}.$$

Отсюда видно, что если $b^2-4ac<0$, то все 4 корня мнимые; если же $b^2-4ac>0$, то могут быть 3 случая: 1) все корни вещественные (как в приведенном выше численном примере), если $-b+\sqrt{b^2-4ac}>0$ и $-b-\sqrt{b^2-4ac}>0$; 2) все корни мнимые, если оба эти выражения дадут отрицательные числа, и 3) два корня вещественные и два мнимые, если $-b+\sqrt{b^2-4ac}>0$, а $-b-\sqrt{b^2-4ac}<0$. Наконец, если $b^2-4ac=0$, то 4 корня делаются попарно равными[1]).

230. Уравнение, у которых левая часть разлагается на множители, а правая есть нуль. Решение таких уравнений сводится к решению уравнений более низких степеней. Так, мы видели (§ 210, II), что для решения неполного квадратного уравнения вида $ax^2 + bx = 0$ надо его левую часть разложить на 2 множителя: $x(ax + b) = 0$ и затем, приняв во внимание, что произведение равно нулю только тогда, когда какой-нибудь сомножитель равен нулю, свести решение этого уравнения к решению двух уравнений 1-й степени:

---

[1]) О преобразовании сложного радикала вида $\sqrt{A+\sqrt{+B}}$ см. в дополнениях ко второй части, § 403.

$$x = 0 \text{ и } ax + b = 0.$$

Подобно этому можно решить неполное кубичное уравнение, не содержащее свободного члена, напр. такое:

$$x^3 + 3x^2 - 10x = 0.$$

Вынеся x за скобки, мы представим уравнение так:

$$x(x^2 + 3x - 10) = 0,$$

и, следовательно, оно распадается на 2 уравнения:

$$x = 0 \text{ и } x^2 + 3x - 10 = 0,$$

из которых находим три решения:

$$x_1 = 0, \quad x_2 = -\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{9}{4} + 10} = 2, \quad x_3 = -\frac{3}{2} - \sqrt{\frac{9}{4} + 10} = -5.$$

Пусть еще уравнение приведено к такому виду:

$$x(x + 4)(x^2 - 5x + 6) = 0.$$

Тогда оно распадается на три уравнения:

$$x = 0; \quad x + 4 = 0; \quad x^2 - 5x + 6 = 0.$$

Уравнения эти дают:

$$x_1 = 0; \quad x_2 = -4; \quad x_3 = 2; \quad x_4 = 3.$$

Глава четвертая.

Иррациональные уравнения.

231. Задача. Периметр прямоугольного треугольника равен 10 *м*, а один из его катетов составляет 2 *м*; найти две другие стороны этого треугольника. $x^2 + x^2$

Обозначив другой катет буквою x, найдем, что гипотенуза должна равняться $\sqrt{2^2 + x^2}$, и, следовательно, будем иметь уравнение:

$$2 + x + \sqrt{4 + x^2} = 10.$$

Мы получили уравнение, в котором неизвестное входит под знак радикала. Уравнения такого рода называются иррациональными. Чтобы решить иррациональное уравнение, его надо предварительно освободить от радикалов, подкоренные выражения которых содержат неизвестное. Если в уравнение, как в нашей задаче, входит только один радикал, то освободиться от него можно таким образом: прежде всего уединим радикал, т. е. перенесем все члены, не содержащие радикала, в одну часть уравнения, оставив радикал в другой части. Тогда наше уравнение будет:

$$\sqrt{4+x^2}=10-2-x=8-x.$$

Теперь возвысим обе части уравнения в квадрат. Очевидно, что если равные числа мы возвысим в одну и ту же степень, то и получим равные числа; поэтому после возвышения в квадрат знак = сохранится:

$$4+x^2=(8-x)^2;\quad 4+x^2=64-16x+x^2.$$

Решив это уравнение, найдем:

$$16x=64-4=60;\quad x=\frac{60}{16}=\frac{15}{4}=3\frac{3}{4}.$$

Тогда гипотенуза будет:

$$\sqrt{4+\left(\frac{15}{4}\right)^2}=\sqrt{4+\frac{225}{16}}=\sqrt{\frac{64+225}{16}}=\frac{1}{4}\sqrt{289}=\frac{1}{4}\cdot 17=4\frac{1}{4}.$$

Пусть еще требуется решить уравнение:

$$10-\sqrt[3]{3x+21}=7.$$

Уединим радикал и возвысим в куб:

$$3=\sqrt[3]{3x+21};\quad 27=3x+21;\quad x=2.$$

Поверка:

$$10-\sqrt[3]{3\cdot 2+21}=10-\sqrt[3]{27}=10-3=7.$$

232. Посторонние решения. Возьмем еще такой пример:

$$x=\sqrt{x+7}-1 \qquad (1)$$

Решаем это уравнение так же, как и предыдущее:

$$x+1=\sqrt{x+7}; \qquad (2)$$
$$x^2+2x+1=x+7; \qquad (3)$$
$$x^2+x-6=0. \qquad (4)$$

$$x=-\frac{1}{2}\pm\sqrt{\frac{1}{4}+6}=-\frac{1}{2}\pm\sqrt{\frac{25}{4}}=-\frac{1}{2}\pm\frac{5}{2},$$

$$x_1=-\frac{1}{2}+\frac{5}{2}=2;\quad x_2=-\frac{1}{2}-\frac{5}{2}=-3.$$

Подставляя найденные решения в уравнения (4), (3), (2) и (1), находим, что оба решения удовлетворяют уравнениям (4) и (3), но уравнениям (2) и (1) удовлетворяет только число 2, а число -3 не удовлетворяет; это решение является посторонним для уравнений (1) и (2). Значит, оно появилось при переходе от уравнения (2) к уравнению (3), т. е. оно появилось от возвышения частей уравнения (2) в квадрат. Рассмотрим поэтому подробнее, что происходит при возвышении частей уравнения в квадрат.

233. Возвышение частей уравнения в квадрат может ввести посторонние решения. Пусть нам даны два уравнения:

$$x+1=\sqrt{x+7} \tag{1}$$

и

$$x+1=-\sqrt{x+7}. \tag{2}$$

Одно из этих уравнений есть то, которое в предыдущем параграфе нам пришлось возвысить в квадрат, а другое отличается от него только знаком перед радикалом. Возвысив в квадрат обе части каждого из этих двух уравнений, мы получим одно и то же уравнение:

$$x^2+2x+1=x+7, \tag{3}$$

так как $(-\sqrt{x+7})^2$ и $(\sqrt{x+7})^2$ равны одному и тому же числу $x+7$. Значит, решения уравнений (1) и (2) должны удовлетворять уравнению (3). Следовательно, уравнение (3) равносильно совокупности уравнений (1) и (2). Поэтому неудивительно, что в числе решений уравнения (3) есть одно, удовлетворящее уравнению (1), и есть другое, удовлетворяющее уравнению (2). Действительно, число -3 удовлетворяет уравнению (2): $-3+1=-\sqrt{-3+7}$, т. е. $-2=-2$. Может случиться, что уравнение (2) совсем не имеет решений; тогда решения уравнения (3) будут только те, которые удовлетворяют уравнению (1); значит, тогда посторонних решений не будет вовсе. Может случиться, что данное уравнение (1) не имеет совсем решений; тогда уравнение (3) содержит только решения уравнения (2), и, значит, все они будут посторонние для уравнения (1).

Таким образом, *возвышение частей уравнения в квадрат может привести к новому уравнению, не равносильному с тем, которое возвышалось.*

То же самое может случиться и при возвышении частей уравнения в какую-нибудь иную степень. Поэтому, решив уравнение, полученное после возвышения в степень, надо полученные корни испытать подстановкою, с целью определить, нет ли между ними посторонних.

234. Освобождение уравнения от двух квадратных радикалов. Пусть надо решить уравнение с двумя квадратными радикалами, подкоренные выражения которых содержат неизвестное:

$$\sqrt{2x-4}-\sqrt{x+5}=1. \qquad (1)$$

Желая сначала освободиться от радикала $\sqrt{2x-4}$, предварительно уединим его:

$$\sqrt{2x-4}=1+\sqrt{x+5}. \qquad (2)$$

Теперь возвысим это уравнение в квадрат:

$$2x-4=1+2\sqrt{x+5}+x+5=6+2\sqrt{x+5}+x,$$

или

$$x-10=2\sqrt{x+5}. \qquad (3)$$

Уравнение это могло также получиться от возвышения в квадрат другого уравнения:

$$-\sqrt{2x-4}=1+\sqrt{x+5}. \qquad (4)$$

Следовательно, уравнение (3) включает в себе решения двух уравнений: (2) и (4), и, следовательно, (1) и (4), так как уравнение (2) вполне равносильно уравнению (1).

Теперь освободим уравнение (3) от радикала посредством вторичного возвышения в квадрат:

$$x^2-20x+100=4x+20,$$

или

$$x^2-24x+80=0. \qquad (5)$$

Уравнение это могло получиться от возвышения в квадрат еще и такого уравнения:

$$x-10=-2\sqrt{x+5}. \qquad (6)$$

Следовательно, оно включает в себе решения уравнений (3 и (6). Но так как уравнение (3) само включает в себе решени уравнений (1) и (4), то, значит, уравнение (5) включает в себе решения 3 уравнений: (1), (4) и (6). Решим теперь уравнение (5):

$$x = 12 \pm \sqrt{144 - 80} = 12 \pm \sqrt{64} = 12 \pm 8;$$
$$x_1 = 12 + 8 = 20; \ x_2 = 12 - 8 = 4.$$

Подстановкою убеждаемся, что данное уравнение (1) удовлетворяется только числом 20, а число 4 ему не удовлетворяет. Это число удовлетворяет уравнению (6).

Замечания. 1) Предложенное уравнение можно решить, и не уединяя радикала. Возвысив в квадрат обе части уравнения (1), мы получим уравнение только с одним радикалом:

$$2x - 4 - 2\sqrt{(2x - 4)\ (x + 5)} + x + 5 = 1.$$

От этого радикала освободимся, как обыкновенно (уединив его):

$$3x = 2\sqrt{(2x - 4)(x + 5)}; \quad 9x^2 = 4(2x - 4)(x + 5);$$
$$9x^2 - 8x^2 + 16x - 40x + 80 = 0; \ x^2 - 24x + 80 = 0.$$

2) Существуют способы освобождения уравнения от какого угодно числа радикалов и не только квадратных, но и других степеней. Мы ограничились указанием лишь самых простых случаев, чаще всего встречающихся.

Глава пятая.

Системы уравнений второй степени.

235. Степень уравнения с несколькими неизвестными. Чтобы определить степень уравнения, в которое входят несколько неизвестных, надо предварительно это уравнение упростить (раскрыть скобки, освободиться от радикалов и знаменателей, которые содержат неизвестные, и сделать приведение подобных членов). Тогда степенью уравнения называется *сумма показателей при неизвестных в том члене уравнения, в котором эта сумма наибольшая.* Напр., 3 уравнения: $x^2 + 2xy - x + 2 = 0$, $3xy = 4$, $2x + y^2 - y = 0$ будут уравнения второй степени; уравнение $3x^2y - y^2 + x + 10 = 0$ есть уравнение третьей степени (с 2 неизвестными) и т. п.

Мы рассмотрим сейчас, как решаются некоторые простейшие системы уравнений 2-й степени с 2 неизвестными.

236. Система двух уравнений, из которых одно первой степени, а другое второй. Пусть дана система:

$$\begin{cases} x^2 - 4y^2 + x + 3y = 1 \text{ . . . . уравнение 2-й степени;} \\ 2x - y = 1 \text{ . . . . уравнение 1-й степени.} \end{cases}$$

Всего удобнее такую систему решить способом подстановки следующим путем (см. § 141). Из уравнения 1-й степени определяем одно какое-нибудь неизвестное, как функцию от другого неизвестного, напр., определяем y, как функцию от x:

$$y = 2x - 1.$$

Тогда уравнение 2-й степени после подстановки дает уравнение с одним неизвестным x:

$$x^2 - 4(2x-1)^2 + x + 3(2x-1) = 1,$$
$$x^2 - 4(4x^2 - 4x + 1) + x + 6x - 3 = 1,$$
$$x^2 - 16x^2 + 16x - 4 + x + 6x - 3 - 1 = 0,$$
$$-15x^2 + 23x - 8 = 0;\ 15x^2 - 23x + 8 = 0.$$
$$x = \frac{23 \pm \sqrt{23^2 - 4\cdot 15\cdot 8}}{2\cdot 15} = \frac{23 \pm \sqrt{529 - 480}}{30} = \frac{23 + \sqrt{49}}{30};$$
$$x_1 = \frac{23+7}{30} = 1; \quad x_2 = \frac{23-7}{30} = \frac{8}{15}.$$

После этого из уравнения $y = 2x - 1$ находим:

$$y_1 = 2\cdot 1 - 1 = 1;\ y_2 = 2\cdot\frac{8}{15} - 1 = \frac{1}{15}.$$

Таким образом, данная система имеет две пары решений:

$$1)\ x_1 = 1,\ y_1 = 1; \qquad 2)\ x_2 = \frac{8}{15},\ y_2 = \frac{1}{15}.$$

Подобным путем всегда можно решить систему двух уравнений, если одно уравнение первой степени, а другое — второй. Так, напр., легко решается система:

$$x + y = a,\ xy = b.$$

Впрочем, эту систему можно решить весьма просто иначе. Так как уравнения дают сумму и произведение неизвестных, то эти неизвестные можно рассматривать как корни такого приведенного квадратного уравнения, у которого коэффициент при x равен — a, а свободный член есть b:

$$z^2 - az + b = 0.$$

Один корень этого уравнения можно принять за x, а другой за y. Значит:

$$x_1 = z_1 = \frac{a}{2} + \sqrt{\frac{a^2}{4} - b}; \quad x_2 = z_2 = \frac{a}{2} - \sqrt{\frac{a^2}{4} - b}.$$

237. Система двух уравнений, из которых каждое второй степени. Такая система вообще не решается элементарно, так как ее решение сводится к решению полного уравнения 4-й степени, а такие уравнения в элементарной алгебре не рассматриваются. Но в некоторых частных случаях можно указать элементарное решение.

Пример.

$$x^2 + y^2 = a, \ xy = b.$$

Если $b \neq 0$, то и $x \neq 0$ и $y \neq 0$ [1]). Поэтому мы можем, не нарушая равносильности уравнений, разделить обе части второго из них на x:

$$y = \frac{b}{x}.$$

Тогда первое уравнение дает:

$$x^2 + \left(\frac{b}{x}\right)^2 = a.$$

Умножив обе части на x^2, получим равносильное уравнение:

$$x^4 + b^2 = ax^2, \text{ т. е. } x^4 - ax^2 + b^2 = 0.$$

Решив это биквадратное уравнение, найдем для x четыре значения. Вставив каждое из них в формулу, выведенную для y, найдем четыре соответствующих значения для y.

Подобным же образом решается и система:

$$x^2 - y^2 = a, \ xy = b.$$

238. Графический способ решения. Начертив графики каждого из данных уравнений (при помощи таблиц частных значений x и y), находим величины координат точек пересечения этих графиков; это и будут корни уравнений.

Пример. Решить систему:

$$1)\ y = x^2 - 3x + 2,$$
$$2)\ x = 2y^2 - 3.$$

---

[1]) Перечеркивание (вертикальной или наклонной чертой) знаков $=$, $>$ и $<$ означает, что их значение берется *в отрицательном смысле*: „не равно“, „не больше“, „не меньше“.

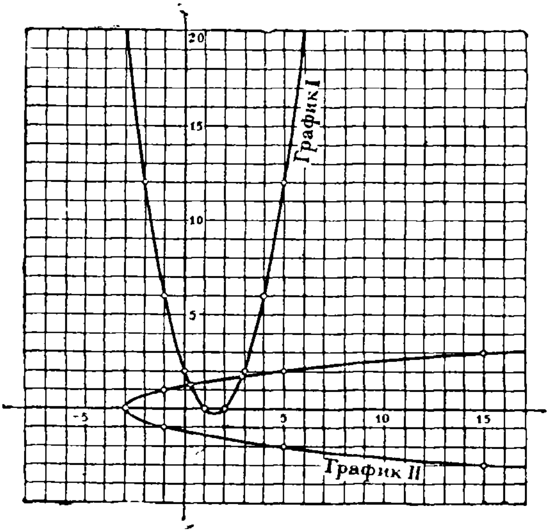
Составим таблицу частных значений x и y для уравнения 1-го:

x	0	1	2	3	4	5	. . .	-1	-2	-3	.
y	2	0	0	2	6	12	. . .	6	12	20	. .

и таблицу частных значений для уравнения 2-го:

y	0	1	2	3	4	. . .	-1	-2	3	. . .
x	-3	-1	5	15	29	. . .	-1	5	15	. . .

По этим значениям построим графики (эти графики будут параболы, черт. 55):



Черт. 55.

Графики пересекаются в двух точках, координаты которых приблизительно будут: $x=0{,}3$; $y=1{,}3$ и $x=2{,}8$; $y=1{,}6$.

Можно найти координаты точек пересечения точнее, если начертим в более широком масштабе те части графиков, которые лежат около точек пересечения. Заметив, что абсциссы точек пересечения лежат: одна между 0 и 1, другая между 2 и 3 и что ординаты их заключены между 1 и 2, составим такие таблицы:

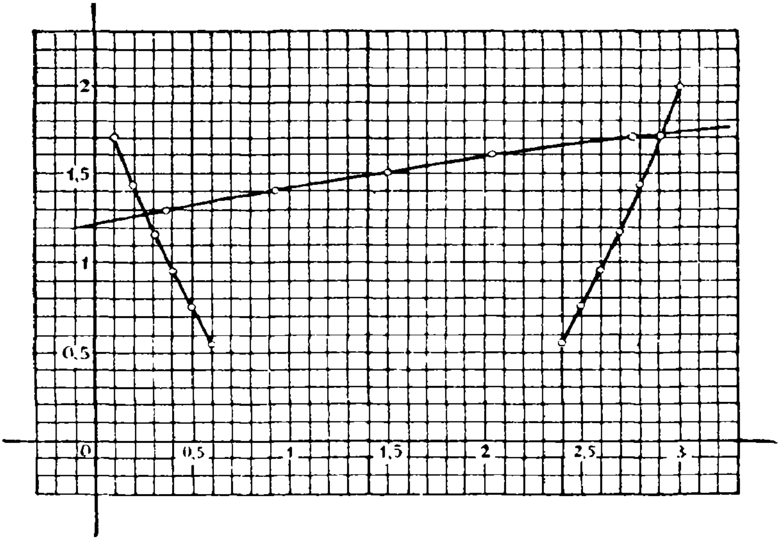
Для уравнения 1-го:

x	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6		2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3
y	1,71	1,44	1,19	0,96	0,75	0,56		0,56	0,75	0,96	1,19	1,44	1,71	2

Для уравнения 2-го:

y	1,1	1.2	1,3	1.4	1,5	1.6	1,7	1,8
x	—0,58	—0,12	0,38	0,92	1,50	2,12	2,78	3.48

Теперь нанесем эти значения на черт. 56:



Черт. 56.

Из такого чертежа координаты точек пересечения, конечно, могут быть определены точнее ($x=0{,}26$, $y=1{,}28$; $x=2{,}91$, $y=1{,}71$).

ОТДЕЛ ДЕСЯТЫЙ.

ПРОГРЕССИИ.

Глава первая.

Арифметическая прогрессия.

239. Задача. Рабочему поручили выкопать колодезь и условились платить ему за первый метр глубины 60 коп., за второй — 75 коп. и т. д., увеличивая плату за каждый следующий метр на 15 коп. Сколько уплатили рабочему, если колодезь был вырыт им в 10 метров глубины?

Для решения задачи надо найти сумму чисел таких:

$$60+75+90+105+120+135+150+165+180+195.$$

Сумму эту мы можем найти проще, чем обыкновенным сложением. Обозначив ее буквою s, напишем две такие строки:

$$s=60+75+90+105+120+135+150+165+180+195,$$
$$s=195+180+165+150+135+120+105+90+75+60.$$

Вторую строку мы написали, переставив слагаемые первой строки в обратном порядке, отчего, конечно, сумма не изменилась. Сложим теперь все числа, стоящие друг под другом:

$$2s=255+255+255+255+255+255+255+255+255+255,$$

т. е.

$$2s=255\cdot 10=2550,$$

и следовательно,

$$s=\frac{2550}{2}=1275.$$

Таким образом, за всю работу пришлось заплатить 12 р. 75 к.

В этой задаче нам пришлось иметь дело с рядом чисел, последовательно возрастающих на одно и то же число. Подобные ряды носят особое название „прогрессий“. Рассмотрим их подробнее.

240. Определение. Арифметической прогрессией *называется такой ряд чисел, в котором каждое число, начиная со второго, равняется предыдущему, сложенному с одним и тем же постоянным для этого ряда числом (положительным или отрицательным).*

Так, два ряда чисел:

$$10,\ 14,\ 18,\ 22,\ 26,\ 30,\ 34,\ 38,\ 42,\ 46,$$
$$6,\ 4,\ 2,\ 0,\ -2,\ -4,\ -6$$

составляют арифметические прогрессии, так как в них каждое число, начиная со второго, равно предыдущему числу, сложенному в первом ряду с положительным числом 4, а во втором с отрицательным числом —2. Числа, составляющие прогрессию, называются ее членами; их число может быть произвольное. Положительное или отрицательное число, которое надо прибавить к предыдущему члену, чтобы получить последующий, называется разностью прогрессии.

Прогрессия называется возрастающей или убывающей, смотря по тому, увеличиваются ли ее члены по мере удаления, от начала ряда, или уменьшаются; разность возрастающей прогрессии есть число положительное, а убывающей — отрицательное.

Для обозначения того, что ряд представляет собою арифметическую прогрессию, иногда ставят в начале ряда знак ÷.

Обыкновенно принято обозначать: первый член a, последний l, разность d, число всех членов n и сумму их s.

Ради краткости слова „арифметическая прогрессия“ мы будем сокращенно писать так: А. П.

241. Формула любого члена арифметической прогрессии. Пусть имеем прогрессию:

$$\div\, 10,\ 14,\ 18,\ 22. \quad \text{(разность 4).}$$

Тогда

2-й член $= 10 + 4 = 14$;
3-й „ $= 10 + 4 + 4 = 10 + 4 \cdot 2 = 18$;
4-й „ $= 10 + 4 + 4 + 4 = 10 + 4 \cdot 3 = 22$, и т. д.

Значит:

$$10\text{-й член} = 10 + 4 \cdot 9 = 46;$$
$$20\text{-й} \;\;„\;\; = 10 + 4 \cdot 19 = 86, \text{ и т. д.}$$

Подобно этому, если имеем прогрессию:

$$\div 6,\ 4,\ 2,\ \ldots\ (\text{разность } -2),$$

то

$$2\text{-й член} = 6 + (-2) = 4;$$
$$3\text{-й} \;\;„\;\; = 6 + (-2) + (-2) = 6 + (-2) \cdot 2 = 2, \text{ и т. д.}$$

Напр.: $10\text{-й член} = 6 + (-2) \cdot 9 = -12$, и т. д.

Вообще, если прогрессия будет такая:

$$\div a,\ b,\ c,\ \ldots\ (\text{разность } d),$$

то

$$2\text{-й член} = a + d;$$
$$3\text{-й} \;\;„\;\; = a + d + d = a + 2d;$$
$$4\text{-й} \;\;„\;\; = a + 2d + d = a + 3d, \text{ и т. д.}$$

Значит, 10-й член окажется $a + 9d$, 15-й член будет $a + 14d$ вообще m-й член будет $a + d(m - 1)$. Таким образом:

Всякий член А. П., начиная со второго, равен первому ее члену, сложенному с произведением разности прогрессии на число всех членов, стоящих перед определяемым членом.

В частности, последний член равен первому члену, сложенному с произведением разности на число всех членов, уменьшенное на 1, т. е.

$$\boxed{l = a + d(n - 1).}$$

Примеры. 1) Найти 10-й член прогрессии: $\div 60,\ 75,\ 90,\ \ldots$

Так как разность этой прогрессии равна 15, то 10-й член будет $60 + 15 \cdot 9 = 195$ (см. задачу § 239).

2) Найти 12-й член прогрессии: $\div 40,\ 37,\ 34,\ \ldots$

Так как разность здесь равна -3, то 12-й член должен быть: $40 + (-3) \cdot 11 = 40 - 33 = 7$.

3) Какое будет n-ое число в последовательном ряду нечетных чисел: 1, 3, 5, ...?

Такое число должно быть: $1 + 2(n - 1) = 1 + 2n - 2 = 2n - 1$.

Следствие. А. П., у которой первый член есть a, разность d и число членов n, может быть изображена так:

$$a,\ a + d,\ a + 2d,\ a + 3d,\ \ldots\ a + d(n - 1).$$

242. Формула суммы всех членов арифметической прогрессии. Предварительно убедимся в следующем свойстве: *сумма двух членов А. П., равноотстоящих от концов ее, равна сумме крайних.* Напр., в прогрессии:

$$\div 3,\ 7,\ 11,\ 15,\ 19,\ 23,$$

находим: $3+23=26$; $7+19=26$; $11+15=26$. Понятно, почему это так: первые слагаемые этих сумм (т. е. 3, 7, 11) идут, все возрастая на 4, а вторые слагаемые (23, 19, 15) идут, все убывая на 4; поэтому сумма их не изменяется. Возьмем еще пример убывающей прогрессии:

$$\div 8,\ 6,\ 4,\ 2,\ 0, -2, -4.$$

В ней: $8+(-4)=4$, $6+(-2)=4$, $4+0=4$. Член 2, отстоящий одинаково от начала и от конца, должен быть сложен сам с собою: $2+2=4$. И здесь объяснение то же самое: слагаемые 8, 6, 4, 2 идут, все уменьшаясь на 2, а слагаемые -4, -2, 0 и 2 идут, все увеличиваясь на 2; от этого сумма их остается без изменения.

Теперь выведем формулу для суммы всех членов любой А. П. Для этого применим тот способ, посредством которого мы нашли сумму членов А. П. в задаче § 239, а именно: сложим почленно два таких равенства:

$$\begin{array}{l} s=a+b+c+\ldots+i+k+l \\ s=l+k+i+\ldots+c+b+a \\ \hline 2s=(a+l)+(b+k)+(c+i)+\ldots+(i+c)+(k+b)+(l+a). \end{array}$$

Но $a+l=b+k=c+i=\ldots=l+a$; следовательно,

$$2s=(a+l)n,$$

откуда

$$s=\frac{(a+l)n}{2},$$

т. е. *сумма всех членов А. П. равна половине произведения суммы крайних членов на число всех членов.*

Таким образом, в задаче § 239 для суммы s по этой формуле найдем:

$$s=[(60+195)\cdot 10]:2=2550:2=1275.$$

Пример 1. Найти сумму натуральных чисел от 1 до n включительно.

Ряд: 1, 2, 3,...n есть А. П., у которой первый член 1, разность 1, число членов n и последний член тоже n; поэтому

$$s = 1 + 2 + 3 + \dots + n = \frac{n(n+1)}{2}.$$

Так: $1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 = \frac{6(6+1)}{2} = 21.$

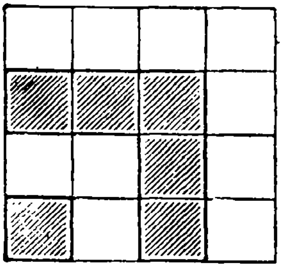
Пример 2. Найти сумму первых n нечетных чисел.

Как мы видели в предыдущем параграфе, n-ое нечетное число равно $2n - 1$; поэтому:

$$s = \frac{[1 + (2n-1)]n}{2} = n^2.$$

Так: $1 + 3 = 4 = 2^2$; $1 + 3 + 5 = 9 = 3^2$; $1 + 3 + 5 + 7 = 16 = 4^2$, и т. д.

Это свойство суммы нечетных чисел наглядно выражается чертежом 57, который составлен так: к квадрату (внизу слева) приставлены 3 таких же квадрата (1 сверху, 1 сбоку и 1 в верхнем углу); к этим квадратам приставлены еще 5 квадратов (2 сверху, 2 сбоку и 1 в верхнем правом углу). К ним, далее, приложены 7 квадратов, потом 9 квадратов и т. д. Тогда очевидно, что



Черт. 57.

$$1 + 3 = 2^2;\ 1 + 3 + 5 = 3^2,\ 1 + 3 + 5 + 7 = 4^2,$$

и т. д.

Пример 3. Найти сумму 10 членов прогрессии:

$$\div 3,\ 2\frac{1}{2},\ 2, \dots$$

Здесь $a = 3$, $d = 2^1/_2 - 3 = -^1/_2$; поэтому 10-й член прогрессии будет $3 - ^1/_2 \cdot 9 = -1^1/_2$, и потому искомая сумма равна:

$$\frac{[3 + (-1^1/_2)]\,10}{2} = 1\frac{1}{2} \cdot 5 = 7\frac{1}{2}.$$

Поверка: $3 + 2\frac{1}{2} + 2 + 1\frac{1}{2} + 1 + \frac{1}{2} + 0 - \frac{1}{2} - 1 - 1\frac{1}{2} = 7\frac{1}{2}.$

243. Замечание. Так как для 5 чисел a, l, d, n и s мы имеем два уравнения:

$$l = a + d(n-1) \quad \text{и} \quad s = \frac{(a+l)n}{2},$$

то по данным трем из этих чисел можем находить остальные два. Для примера решим следующую задачу:

Найти число членов прогрессии, у которой первый член 7, разность — 2 и сумма всех членов 12.

В этой задаче даны: $a = 7$, $d = -2$ и $s = 12$; остаются неизвестными l и n. Подставив в уравнение заданные числа, находим:

$$l = 7 - 2(n-1) = 9 - 2n; \quad 12 = \frac{(7+l)n}{2},$$

откуда

$$12 = \frac{(7+9-2n)n}{2} = (8-n)n;$$

$$n^2 - 8n + 12 = 0; \quad n = 4 \pm \sqrt{16-12} = 4 \pm 2;$$

$$n_1 = 6, \qquad n_2 = 2.$$

Получаются два ответа: число членов или 6, или 2. И действительно, две прогрессии: 7, 5, 3, 1 — 1, — 3 и 7, 5 имеют одну и ту же сумму 12.

244. Формула суммы квадратов чисел натурального ряда. При решении некоторых математических вопросов приходится пользоваться не только формулою, определяющею сумму чисел натурального ряда, но и формулой, определяющей сумму квадратов этих чисел. Формулу эту можно вывести следующим образом: Возьмем n таких числовых тождеств (§ 61, *г*):

$$2^3 = (1+1)^3 = 1^3 + 3 \cdot 1^2 \cdot 1 + 3 \cdot 1 \cdot 1^2 + 1^3$$

$$3^3 = (2+1)^3 = 2^3 + 3 \cdot 2^2 \cdot 1 + 3 \cdot 2 \cdot 1^2 + 1^3$$

$$4^3 = (3+1)^3 = 3^3 + 3 \cdot 3^2 \cdot 1 + 3 \cdot 3 \cdot 1^2 + 1^3$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$(n+1)^3 = n^3 + 3n^2 \cdot 1 + 3n \cdot 1^2 + 1^3.$$

Сложим все эти тождества. Тогда 2^3, стоящее в левой части первого равенства, взаимно уничтожится с 2^3, стоящим в правой части второго равенства, 3^3 в левой части второго равенства уничтожится с 3^3 в правой части третьего равенства, и т. д. После такого уничтожения получим:

$$(n+1)^3 = 1 + 3(1^2 + 2^2 + 3^2 \ldots + n^2) + 3(1 + 2 + 3 \ldots + n) + n.$$

Обозначив для краткости:

$$1 + 2 + 3 + \ldots + n = S_1,$$

$$1^2 + 2^2 + 3^2 + \ldots + n^2 = S_2,$$

мы будем иметь:

$$(n+1)^3 = 1 + 3S_2 + 3S_1 + n,$$

откуда:

$$S_2 = \frac{(n+1)^3 - 1 - n}{3} - S_1 = \frac{n^3 + 3n^2 + 2n}{3} - S_1.$$

Но

$$n^3 + 3n^2 + 2n = n^3 + 2n^2 + n^2 + 2n = n^2(n+2) + n(n+2) =$$
$$= (n+2)(n^2+n) = n(n+1)(n+2);$$

поэтому:

$$S_2 = \frac{n(n+1)(n+2)}{3} - S_1.$$

Из равенства

$$S_1 = \frac{n(n+1)}{2}$$

находим:

$$n(n+1) = 2S_1.$$

Следовательно:

$$S = \frac{2S_1(n+2)}{3} - S_1 = S_1\left[\frac{2(n+2)}{3} - 1\right] = S_1 \cdot \frac{2n+1}{3},$$

или

$$S_2 = \frac{n(n+1)}{2} \cdot \frac{2n+1}{3} = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}.$$

Например:

$$1^2 + 2^2 + 3^2 = \frac{3(3+1)(6+1)}{6} = 14;$$

$$1^2 + 2^2 + 3^2 + 4^2 = \frac{4(4+1)(8+1)}{6} = 30, \text{ и т. д.}$$

Глава вторая.

Геометрическая прогрессия.

245. Задача. Говорят, что индийский принц Сирам предложил изобретателю шахматной игры просить у него награды, какую он хочет. Тот попросил, чтобы ему дали за первый квадрат шахматной доски 1 пшеничное зерно, за второй квадрат 2 зерна, за третий 4 и т. д., увеличивая вдвое за каждый из следующих квадратов. Принц согласился. Но когда подсчитали количество пшеницы, которое следует выдать за все 64 квадрата шахматной доски, то оказалось, что награда в этом размере не может быть выдана по недостатку пшеницы. Сколько же зерен пришлось бы выдать изобретателю?

Количество зерен, которое надлежало бы выдать за все 64 квадрата, равно сумме s следующего ряда чисел:

$$s = 1 + 2 + 2^2 + 2^3 + \ldots + 2^{62} + 2^{63}.$$

Мы можем найти эту сумму так: умножим обе части написанного равенства на 2:

$$2s = 2 + 2^2 + 2^3 + 2^4 + \ldots + 2^{63} + 2^{64}.$$

Теперь вычтем из этого равенства предыдущее; тогда получим:

$$s = 2^{64} - 1.$$

Значит, придется вычислить степень 2^{64}, что можно сделать или последовательным умножением на 2 по формуле:

$$2^{64} = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \ldots (64 \text{ множителя})$$

или по формуле:

$$2^{64} = [(2^{16})^2]^2 = (65\,536^2)^2;$$

окончательное число зерен будет:

$$s = 2^{64} - 1 = 18\,446\,744\,073\,709\,551\,615.$$

Можно вычислить, что если бы такое число зерен рассыпать равномерно по всей земной суше, то образовался бы слой пшеницы толщиною около 9 *мм.*

В этой задаче мы имеем дело с рядом чисел, из которых каждое, начиная со второго, равно предыдущему числу, умноженному на одно и то же число. Такие ряды чисел называются геометрическими прогрессиями. Рассмотрим их подробнее.

246. Определение. *Геометрической прогрессией называется такой ряд чисел, в котором каждое число, начиная со второго, равняется предшествующему, умноженному на одно и то же число, постоянное для этого ряда.* Так три ряда:

$$2,\ 4,\ 8,\ 16,\ 32,\ 64,\ 128, \ldots;$$
$$8, -16,\ 32, -64,\ 128, -256,\ 512;$$
$$20,\ 10,\ 5,\ {}^5/_2,\ {}^5/_4,\ {}^5/_8,\ {}^5/_{16},\ {}^5/_{32}$$

составляют геометрические прогрессии, потому что в этих рядах каждое число, начиная со второго, получается из предшествующего умножением: в первом ряду на 2, во втором на -2 и в третьем на $^1/_2$.

Для обозначения того, что данный ряд есть прогрессия геометрическая, иногда ставят в начале его знак $\div\div$.

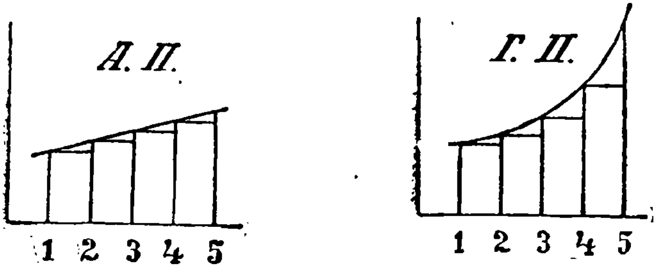
Как и в арифметической прогрессии, числа, составляющие геометрическую прогрессию, называются ее членами; число, на которое надо умножить предыдущий член, чтобы получить последующий, называется **знаменателем** прогрессии.

Прогрессия называется **возрастающею** или **убывающею**, смотря по тому, увеличивается или уменьшается **абсолютная величина** членов прогрессии по мере удаления от начала ряда; так, из трех указанных выше прогрессий первая и вторая — возрастающая, а третья — убывающая. В возрастающей прогрессии абсолютная величина знаменателя больше 1, в убывающей она меньше 1.

Обыкновенно знаменатель прогрессии обозначают буквою q, а члены, число их и сумму обозначают так же, как это принято для арифметической прогрессии, т. е. a, b, c, ... l (последний член), n (число членов) и s (сумма).

Для краткости слова „геометрическая прогрессия“ мы будем сокращенно писать так: Г. П.

247. Сравнение Г. П. с А. П. Разность двух рядом стоящих членов в А. П. остается одна и та же, вследствие чего члены ее возрастают или убывают равномерно. Посмотрим, какова будет разность двух соседних членов в Г. П.:



Черт. 58.

$$\div\!\div\ a,\ b,\ c,\ \ldots\ (\text{знаменатель } q).$$

Из определения прогрессии следует: $b = aq$, $c = bq$, $d = cq$ и т. д.; следовательно:

$$b - a = aq - a = a\,(q - 1);$$
$$c - b = bq - b = b\,(q - 1),\ \text{и т. д.}$$

Если прогрессия возрастающая и члены ее положительные, то тогда $a < b < c < \ldots$ и т. д.; поэтому и $a\,(q-1) < b\,(q-1) < c\,(q-1) < \ldots$, т. е.

$$b - a < c - b < d - c < \ldots\ \text{и т. д.}$$

Значит, в возрастающей Г. П. с положительными членами *разность двух соседних членов увеличивается по мере удаления их от начала ряда;* вследствие этого члены такой прогрессии, по мере их удаления от начала ряда, возрастают все быстрее и быстрее, что наглядно изображено на черт. 58 (правом). Напр.:

$$\div\, 2,\ 4,\ 6,\ 8,\ 10,\ 12, \ldots$$

$$\div\div\, 2,\ 4,\ 8,\ 16,\ 32,\ 64, \ldots$$

248. Формула любого члена Г. П. Пусть мы имеем такую Г. П.

$$\div\div\ 3,\ 6,\ 12,\ 24, \ldots \text{ (знаменатель 2).}$$

Тогда

2-й член $= 3 \cdot 2 = 6$;

3-й „ $= 3 \cdot 2 \cdot 2 = 3 \cdot 2^2 = 12$;

4-й „ $= 3 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 3 \cdot 2^3 = 24$, и т. д.

Напр., 10-й член $= 3 \cdot 2^9 = 3 \cdot 512 = 1536$, и т. д.

Подобно этому, если мы имеем прогрессию:

$$\div\div\, 10,\ 5,\ 2^1/_2,\ 1^1/_4, \ldots \text{(знаменатель } ^1/_2\text{)},$$

то

2-й член $= 10 \cdot {}^1/_2 = 5$;

3-й „ $= 10 \cdot {}^1/_2 \cdot {}^1/_2 = 10 \cdot ({}^1/_2)^2 = {}^{10}/_4 = 2^1/_2$;

4-й „ $= 10 \cdot {}^1/_2 \cdot {}^1/_2 \cdot {}^1/_2 = 10 \cdot ({}^1/_2)^3 = {}^{10}/_8 = 1^1/_4$, и т. д.;

Возьмем теперь прогрессию в буквенном виде:

$$\div\div\ a,\ b,\ c, \ldots \text{ (знаменатель } q\text{).}$$

Согласно определению Г. П., находим:

2-й член $= aq = aq^1$;

3 „ „ $= aq \cdot q = aq^2$;

4 „ „ $= aq^2 \cdot q = aq^3$, и т. д.

Таким образом, 10-й член $= aq^9$, вообще m-й член $= aq^{m-1}$. Значит: *всякий член Г. П., начиная со второго, равен первому члену, умноженному на такую степень знаменателя, которой показатель есть число членов, предшествующих определяемому* [1].

---

[1] Правило это, равно как и аналогичное правило для арифметической прогрессии (§ 241), мы имеем право применить и к первому члену, если примем во внимание, что число членов, предшествующих первому члену, равно нулю. Действительно, применяя эти правила к первому члену прогрессии, получим:

$$a = a + d \cdot 0 \text{ и } a = aq^0.$$

Но $d \cdot 0 = 0$ и $q^0 = 1$ (§ 65). Следовательно, равенства эти дают верные результаты:

$$a = a + 0 = d \text{ и } a = a \cdot 1 = a.$$

В частности, последний член l, которому предшествует $n-1$ членов, выразится формулой:

$$l=aq^{n-1}.$$

Пример 1. Найти 6-й член прогрессии $\div\div 3,\ 12,\ldots$

Знаменатель такой прогрессии есть $12:3=4$; поэтому 6-й член $=3\cdot 4^5=3072$.

Пример 2. Найти 10-й член прогрессии $\div\div 20,\ 10,\ldots$

Так как знаменатель этой прогрессии равен $10:20={}^1/_2$, то 10-й член равен

$$20\cdot\left(\frac{1}{2}\right)^9=20\cdot\frac{1}{2^9}=5\cdot 2^2\cdot\frac{1}{2^9}=\frac{5}{2^7}=\frac{5}{128}.$$

Замечание. Геометрическую прогрессию, у которой первый член есть a, знаменатель q и число всех членов n, можно изобразить так:

$$\div\div a,\ aq,\ aq^2,\ aq^3,\ldots aq^{n-1}.$$

249. Формула суммы всех членов Г. П. Применим тот прием, которым мы раньше (§ 245) нашли сумму $1+2+2^2+\ldots+2^{63}$. Умножим обе части равенства:

$$s=a+b+c+\ldots+k+l \tag{1}$$

на знаменатель q; тогда получим:

$$sq=aq+bq+cq+\ldots+kq+lq.$$

Но

$$aq=b,\ bq=c,\ cq=d,\ldots\ kq=l;$$

следовательно,

$$sq=b+c+d+\ldots+l+lq. \tag{2}$$

Вычтя почленно из равенства (2) равенства (1), найдем:

$$sq-s=lq-a,\ \text{т. е.}\ (q-1)\,s=lq-a;$$

откуда:

$$s=\frac{lq-a}{q-1}.$$

Значит, *сумма всех членов Г. П. равна дроби, у которой числитель есть разность между произведением последнего члена на знаменатель Г. П. и первым членом ее, а знаменатель есть разность между знаменателем прогрессии и единицей.*

Замечание. Так как для прогрессии убывающей $lq < a$ и $q < 1$, то для такой прогрессии лучше придать формуле суммы иной вид, умножив числитель и знаменатель дроби на -1:

$$s = \frac{a - lq}{1 - q}.$$

Пример. Найти сумму 8 членов прогрессии, у которой $a = 1$ и $q = {}^1/_3$.

Тогда:

$$l = 1 \cdot ({}^1/_3)^7 = ({}^1/_3)^7$$

и

$$s = \frac{1 - ({}^1/_3)^7 \cdot {}^1/_3}{1 - {}^1/_3} = \frac{1 - ({}^1/_3)^8}{{}^2/_3} = \frac{3 - 3({}^1/_3)^8}{2} = \frac{3280}{2187}.$$

250. Пример задачи на Г. П. Найти первый член a и последний l, если $q = 3$, $n = 5$ и $s = 242$.

Сначала находим l по формуле $l = aq^{n-1} = a \cdot 3^4$ и затем эту величину и данные числа подставим в формулу для суммы:

$$242 = \frac{a \cdot 3^4 \cdot 3 - a}{3 - 1} = \frac{a(3^5 - 1)}{2} = 121a,$$

откуда:

$$a = 242 : 121 = 2.$$

Теперь находим:

$$l = 2 \cdot 3^4 = 162.$$

Поверка:

$$2 + 6 + 18 + 54 + 162 = 242.$$

Глава третья.

Бесконечные прогрессии.

251. Некоторые свойства таких прогрессий. Если ряд чисел, составляющих прогрессию, может быть продолжаем без конца, то прогрессия называется бесконечной. Рассмотрим некоторые свойства таких прогрессий.

а) Возьмем бесконечную возрастающую А. П., у которой разность очень мала, напр. такую:

$$\div 1;\ 1{,}01;\ 1{,}02;\ 1{,}03;\ 1{,}04, \ldots$$

Несмотря на то, что члены этой прогрессии, при удалении от начала ряда, растут очень медленно, они, однако, при достаточном удалении могут превзойти любое данное число, как бы велико оно ни было; напр., они могут сделаться больше 1 000 000. Действительно, для того, чтобы $(n+1)$-й член такой прогрессии, равный сумме $1+0{,}01n$, мог сделаться больше 1 000 000, достаточно для n взять такое большое число, которое удовлетворяло бы неравенству:

$$1+0{,}01n > 1\,000\,000.$$

Из него находим:

$$n > \frac{999\,999}{0{,}01} = 99\,999\,900.$$

Так как в бесконечной прогрессии число n может сделаться как угодно большим, то оно может сделаться больше 99 999 900; и тогда $1+0{,}01n$ сделается больше 1 000 000.

Рассуждение это можно повторить о всякой арифметической возрастающей бесконечной прогрессии; поэтому мы можем высказать такое общее заключение: *член бесконечной возрастающей А. П., при достаточном его удалении от начала ряда, может превзойти любое данное число, как бы оно велико ни было.*

б) Возьмем теперь бесконечную возрастающую Г. П. с положительными членами, напр. такую:

$$\div\!\div\ \mathbf{1};\ \mathbf{1{,}01};\ 1{,}01^2=1{,}0201;\ 1{,}01^3=1{,}030301;\ldots(\text{знам. } 1{,}01),$$

и сравним ее с бесконечной А. П.:

$$\div\ \mathbf{1};\ \mathbf{1{,}01};\ 1{,}02;\ 1{,}03;\ldots(\text{разность } 0{,}01),$$

у которой первые два члена одинаковы со взятой нами Г. П

Как мы видели раньше, члены Г. П. возрастают быстрее чем члены А. П. Но член взятой нами А. П., при достаточном удалении от начала ряда, может превзойти любое число, например может сделаться больше 1 000 000; значит, соответствующий член нашей Г. П. и подавно может сделаться больше всякого числа.

Таким образом, *член бесконечной возрастающей Г. П. (с положительными членами), при достаточном удалении его от начала ряда, может превзойти любое данное число.*

Свойство это применимо и к такой возрастающей Г. П., у которой члены, все или некоторые, отрицательные числа (например -5, -10, -20,... или 5, -10, 20, -40,...); тогда надо только говорить не о самих членах, а об их абсолютной величине.

в) Возьмем какой-нибудь пример бесконечной убывающей Г. П. с положительными членами, например такой:

$$1,\ \frac{1}{2},\ \frac{1}{2^2},\ \frac{1}{2^3},\ldots\frac{1}{2^n},\ldots\ \left(\text{знаменатель } \frac{1}{2}\right).$$

Члены такой прогрессии при удалении их от начала ряда, конечно, уменьшаются, но могут ли они при этом сделаться меньше всякого данного положительного числа, например меньше 0,000001, это сразу не видно. Чтобы обнаружить это, возьмем вспомогательную прогрессию, члены которой обратны членам взятой нами прогрессии:

$$1,\ 2,\ 2^2,\ 2^3, \ldots\ 2^n, \ldots \text{ (знаменатель 2).}$$

Прогрессия эта возрастающая, и потому, как мы сейчас видели, члены ее могут превзойти любое данное число; значит, они превзойдут и 1 000 000. Если же окажется, что

$$2^n > 1\,000\,000,$$

то тогда, очевидно:

$$\frac{1}{2^n} < \frac{1}{1\,000\,000}.$$

Применим это рассуждение к какой-угодно бесконечной убывающей Г. П. (с положительными членами):

$$\div\div\, a,\ b,\ c, \ldots \text{ (знаменатель } q < 1\text{).}$$

Чтобы показать, что член этой прогрессии, при достаточном удалении его от начала ряда, может сделаться меньше любого положительного числа N, возьмем вспомогательную Г. П.:

$$\div\div\, \frac{1}{a},\ \frac{1}{aq},\ \frac{1}{aq^2},\ \frac{1}{aq^3}, \ldots\ \frac{1}{aq^n}\ \left(\text{знаменатель } \frac{1}{q} > 1\right).$$

Прогрессия эта возрастающая, так как ее знаменатель > 1. Но член возрастающей Г. П. может превзойти всякое данное число; следовательно, он превзойдет и число $\frac{1}{N}$. Поэтому при достаточно большом n будет удовлетворено неравенство:

$$\frac{1}{aq^n} > \frac{1}{N}, \text{ и тогда } aq^n < N.$$

Итак, *член бесконечной убывающей Г. П., при достаточном удалении его от начала ряда, может сделаться меньше любого данного положительного числа.*

252. Понятие о пределе. Положим, что в бесконечной убывающей геометрической прогрессии:

$$1,\ \frac{1}{2},\ \frac{1}{2^2},\ \frac{1}{2^3}, \ldots$$

мы взяли 10 членов от начала; тогда последний (10-й) член будет $(^1/_2)^9$, а сумма этих 10 членов (которую обозначим s_{10}) будет

$$s_{10}=\frac{a-lq}{1-q}=\frac{1-(^1/_2)^9\cdot{}^1/_2}{1-{}^1/_2}=\frac{1-(^1/_2)^{10}}{^1/_2}=2-(^1/_2)^9.$$

Подобно этому, найдем:

$$s_{11}=2-\frac{1}{2^{10}};\ s_{12}=2-\frac{1}{2^{11}};\ \ldots\ s_{n+1}=2-\frac{1}{2^n}.$$

Мы видим, что по мере увеличения числа членов сумма их приближается все более и более к 2. Так сумма s_{n+1} меньше 2 на дробь $(^1/_2)^n$, а эта дробь, как мы видели, при достаточно большом n, делается меньшей любого данного положительного числа.

Если какое-нибудь переменное число (в нашем примере сумма членов прогрессии), изменяясь, приближается все более и более к некоторому постоянному числу (в нашем примере к числу 2) так, что разность между этим числом и переменным делается меньшей любого данного положительного числа, как бы мало оно ни было, то это постоянное число называется **пределом** переменного[1]).

Заметив это, мы можем сказать, что переменная сумма

$$1+\frac{1}{2}+\frac{1}{2^2}+\frac{1}{2^3}+\ldots+\frac{1}{2^n}$$

при неограниченном возрастании n **стремится к пределу** что на письме выражают так:

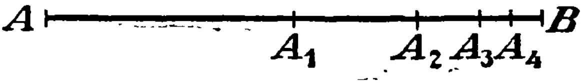
$$\left(1+\frac{1}{2}+\frac{1}{2^2}+\frac{1}{2^3}+\ldots+\frac{1}{2^n}\right)\longrightarrow 2,$$
$$\text{если } n\longrightarrow\infty$$

(стрелки заменяют собою слово „стремится“), или пишут так:

$$\text{пред.}\left(1+\frac{1}{2}+\frac{1}{2^2}+\frac{1}{2^3}+\ldots+\frac{1}{2^n}\right)_{n=\infty}=2.$$

Здесь „пред.“ есть сокращенное слово „предел“, а добавление внизу скобки: $n=\infty$ заменяет собою фразу: „когда n неограниченно увеличивается“ (когда n стремится к ∞).

Можно наглядно показать (черт. 59), что рассматриваемая сумма приближается неограниченно близко к 2. Пусть



Черт. 59.

---

[1]) Более точное определение предела будет дано в главе о пределах (часть 2-я).

отрезок $AA_1=1$ и $AB=2$. Тогда $1+{}^1/_2=AA_2$, $1+{}^1/_2+{}^1/_4=AA_3$, $1+{}^1/_2+{}^1/_4+{}^1/_8=AA_4$ и т. д.; ясно, что при увеличении числа членов прогрессии мы неограниченно придвигаемся к точке B, и, значит, сумма $1+{}^1/_2+{}^1/_4+\ldots$ стремится к отрезку $AB=2$.

253. Формула предела суммы убывающей. Если в бесконечной Г. П.:

$$\div\!\!\div\; a,\ aq,\ aq^2,\ aq^3,\ldots(q<1)$$

возьмем n членов от начала, то последний член будет aq^{n-1}, и сумма их будет:

$$s_n=\frac{a-lq}{1-q}=\frac{a-aq^n}{1-q}=\frac{a}{1-q}-\frac{aq^n}{1-q}.$$

Предположим, что n неограниченно увеличивается. Тогда число $\frac{a}{1-q}$ остается неизменным, а дробь $\frac{aq^n}{1-q}$ все уменьшается, и притом неограниченно, так как числитель ее, как мы видели раньше, делается меньше любого данного положительного числа, а знаменатель остается неизменным. Значит:

$$s_n\to\frac{a}{1-q},\ \text{если}\ n\to\infty.$$

Таким образом, *при неограниченном увеличении числа членов убывающей Г. П. сумма их стремится к пределу, равному частному от деления первого члена прогрессии на избыток единицы над знаменателем прогрессии.*

Так:

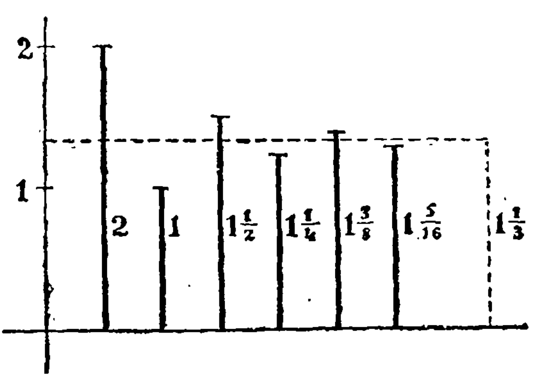
$$1+\frac{1}{2}+\frac{1}{2^2}+\frac{1}{2^3}+\ldots+\frac{1}{2^n}\to\frac{1}{1-{}^1/_2}=2.$$
$$\text{если}\ n\to\infty$$

Замечание. Это свойство принадлежит Г. П. и при отрицательном знаменателе. Например, предел суммы членов Г. П.:

$$\div\!\!\div\; 2,\ -1,\ +{}^1/_2,\ -{}^1/_4+{}^1/_8,\ -{}^1/_{16},\ \ldots$$

у которой $q=-{}^1/_2$ и $a=2$, равен:

$$\frac{2}{1-(-{}^1/_2)}=\frac{2}{{}^3/_2}=\frac{4}{3}=1^1/_3$$



Черт. 60.

На прилагаемом чертеже 60 изображен ряд ординат, наглядно выражающих сравнительную величину одного, двух, трех, четырех и т. д. членов данной прогрессии. Ординаты эти поочередно становятся то большими $1^1/_3$, то меньшими $1^1/_3$, приближаясь к этому числу все более и более.

254. Применение Г. П. к десятичным периодическим дробям. Возьмем следующие два примера десятичных периодических дробей (чистых, т. е. таких, у которых период начинается тотчас после запятой): 1) 0,999... и 2) 0,232323...

Дроби эти представляют собою суммы:

$$1)\ \frac{9}{10}+\frac{9}{100}+\frac{9}{1000}+\frac{9}{10\,000}+\ldots$$

$$2)\ \frac{23}{100}+\frac{23}{10\,000}+\frac{23}{1\,000\,000}+\ldots$$

Слагаемые этих сумм суть члены бесконечных убывающих Г. П., у которых знаменатели прогрессии: у первой $^1/_{10}$, у второй $^1/_{1000}$. Суммы эти стремятся к пределам, равным:

$$1)\ \frac{^9/_{10}}{1-{^1/_{10}}}=\frac{9}{10-1}=\frac{9}{9}=1;$$

$$2)\ \frac{^{23}/_{100}}{1-{^1/_{100}}}=\frac{23}{100-1}=\frac{23}{99}.$$

Из этих примеров видно, что *чистая периодическая дробь равна такой обыкновенной дроби, у которой числитель есть период, а знаменатель цифра 9, повторенная столько раз, сколько цифр в периоде.*

Надо только иметь в виду, что в этой фразе слова: „чистая периодическая дробь“ поставлены ради краткости; подробнее надо было бы сказать: предел, к которому стремится чистая периодическая дробь, когда число периодов возрастает, равен и т. д.

Возьмем теперь два примера периодических дробей смешанных (т. е. таких, у которых период начинается не тотчас после запятой): 3) 0,2888... и 4) 0,3545454... Дроби эти можно представить в виде суммы:

$$3)\ \frac{2}{10}+\frac{8}{100}+\frac{8}{1000}+\frac{8}{10\,000}+\ldots$$

$$4)\ \frac{3}{10}+\frac{54}{1000}+\frac{54}{100\,000}+\frac{54}{10\,000\,000}+\ldots$$

Слагаемые этих сумм, начиная со второго, суть члены бесконечных убывающих Г. П.; в 3-й сумме знаменателем служит дробь $^1/_{10}$, в 4-й сумме — дробь $^1/_{100}$. Поэтому пределы, к которым стремятся эти суммы, будут:

$$3)\ \frac{2}{10}+\frac{^8/_{100}}{1-{^1/_{10}}}=\frac{2}{10}+\frac{8}{100-10}=\frac{2}{10}+\frac{8}{90}=$$

$$=\frac{2\cdot 9+8}{90}=\frac{2\cdot 10-2+8}{90}=\frac{28-2}{90}=\frac{26}{90}=\frac{13}{45};$$

$$4)\ \frac{3}{10}+\frac{^{54}/_{1000}}{1-{^1/_{100}}}=\frac{3}{10}+\frac{54}{1000-10}=\frac{3}{10}+\frac{54}{990}=$$

$$=\frac{3\cdot 99+54}{990}=\frac{3\cdot 100-3+54}{990}=\frac{354-3}{990}=\frac{351}{990}=\frac{39}{110}$$

Из этих примеров видно, что *смешанная периодическая дробь равна такой обыкновенной дроби, у которой числитель есть число, стоящее до второго периода, без числа, стоящего до первого периода, а знаменатель есть цифра 9, повторенная столько раз, сколько цифр в периоде, со столькими нулями на конце, сколько цифр между запятой и периодом.*

Здесь тоже надо сделать замечание, что разумеется не сама периодическая дробь, а предел, к которому она стремится.

ОТДЕЛ ОДИННАДЦАТЫЙ.

ОБОБЩЕНИЕ ПОНЯТИЯ О ПОКАЗАТЕЛЯХ.

Глава первая.

Целые показатели.

255. Свойства целых положительных показателей. Показатели степени до сего времени предполагались нами целыми и положительными, причем мы им придавали смысл, выражаемый в следующем определении:

Возвысить число a в степень с целым и положительным показателем n — значит найти произведение n одинаковых сомножителей $aaa...a$.

Перечислим свойства этих показателей, известные нам из предыдущих глав алгебры:

1) при умножении степеней одного и того же числа показатели их складываются (§ 53);

2) при делении степеней одного и того же числа показатель делителя вычитается из показателя делимого, если показатель делителя не больше показателя делимого (§ 64);

3) всякое число, возвышенное в нулевую степень, дает 1 (§ 65);

4) от возвышения отрицательного числа в степень с четным показателем получается положительное число, а с нечетным показателем — отрицательное (§ 153);

5) чтобы возвысить в степень произведение, достаточно возвысить в эту степень каждый сомножитель отдельно (§ 154, а);

6) чтобы возвысить степень в степень, достаточно перемножить показатели этих степеней (§ 154, б);

7) чтобы возвысить в степень дробь, достаточно возвысить в эту степень отдельно числитель и знаменатель (§ 154, в);

8) чтобы возвысить радикал в степень, достаточно возвысить в эту степень подкоренное число (§ 205, г);

9) чтобы извлечь корень из степени, достаточно разделить показатель степени на показатель корня, если такое деление выполняется нацело (§ 168, б).

Теперь мы расширим понятие о показателях, введя показатели отрицательные и дробные, которые до сего времени мы не употребляли. Мы увидим при этом, что *все свойства целых положительных показателей сохраняются и для показателей отрицательных и дробных.*

256. Отрицательные целые показатели. Мы видели (§ 64), что при делении степеней одного и того же числа показатель делителя вычитается из показателя делимого в том случае, если показатель делителя не больше показателя делимого. Теперь мы условимся производить вычитание показателей и в том случае, когда показатель делителя больше показателя делимого; тогда мы получим в частном букву с отрицательным показателем; например: $a^2 : a^5 = a^{-3}$. Таким образом, число с отрицательным показателем мы условимся употреблять для обозначения частного от деления степеней этого числа в том случае, когда показатель делителя превосходит показатель делимого на столько единиц, сколько их находится в абсолютной величине отрицательного показателя. Так, a^{-2} означает частное $a : a^3$, или $a^2 : a^4$, или $a^3 : a^5$, вообще частное $a^m : a^{m+2}$.

Понимаемое в этом смысле *число с отрицательным показателем равно дроби, у которой числитель есть 1, а знаменатель — то же число, но с положительным показателем, равным по абсолютной величине отрицательному показателю.*

Действительно, согласно нашему условию, мы должны иметь:

$$a^{-1} = \frac{a^m}{a^{m+1}}; \quad a^{-2} = \frac{a^m}{a^{m+2}}; \quad x^{-3} = \frac{x^m}{x^{m+3}} \text{ и т. д.}$$

Сократив две первые дроби на a^m и третью дробь на x^m (т. е. в обоих случаях сократив дроби на числитель), получим:

$$a^{-1} = \frac{1}{a}; \quad a^{-2} = \frac{1}{a^2}; \quad x^{-3} = \frac{1}{x^3} \text{ и т. д.}$$

Вообще

$$a^{-n} = \frac{a^m}{a^{m+n}} = \frac{1}{a^n}.$$

Заметим, что отрицательные показатели дают возможность представить всякое дробное алгебраическое выражение под видом целого; для этого стоит только все множители знаменателя перенести множителями в числитель, взяв их с отрицательными показателями. Например:

$$\frac{3a}{b^2c^3} = 3a \cdot \frac{1}{b^2} \cdot \frac{1}{c^3} = 3ab^{-2}c^{-3}.$$

Само собою разумеется, что такое преобразование данного выражения в целое есть только изменение одного внешнего вида выражения, а не содержания его.

257. Действия над степенями с отрицательными показателями. Убедимся теперь, что все действия над степенями с отрицательными показателями можно производить по тем же правилам, какие были прежде выведены для показателей положительных. Достаточно обнаружить это только для умножения и возвышения в степень, так как правила обратных действий — деления и извлечения корня — составляют простое следствие правил прямых действий — умножения и возвышения.

Умножение. Предстоит показать, что при умножении степеней показатели одинаковых букв складываются и в том случае, когда эти показатели отрицательные. Например, убедимся, что:

$$a^{-2}\cdot a^{-3} = a^{-2+(-3)} = a^{-5}$$

Действительно, заменив степени с отрицательными показателями дробями и произведя действие умножения по правилам, относящимся к дробям, получим:

$$a^{-2}\cdot a^{-3} = \frac{1}{a^2}\cdot\frac{1}{a^3} = \frac{1}{a^2\cdot a^3} = \frac{1}{a^5} = a^{-5}.$$

Подобно этому:

$$x^{-4}\cdot x^3 = x^{-4+3} = x^{-1},$$

так как

$$x^{-4}\cdot x^3 = \frac{1}{x^4}\cdot x^3 = \frac{x^3}{x^4} = \frac{1}{x} = x^{-1}.$$

Возвышение в степень. Надо показать, что при возвышении в степень показатели этих степеней перемножаются и в том случае, когда они отрицательные. Например, убедимся, что

$$(a^{-3})^{-4} = a^{(-3)\cdot(-4)} = a^{12}.$$

Действительно:

$$(a^{-3})^{-4} = \frac{1}{(a^{-3})^4} = \frac{1}{\left(\frac{1}{a^3}\right)^4} = \frac{1}{\frac{1}{\ }} = a^{12}.$$

Подобно этому:

$$(x^3)^{-4}=x^{-12},$$

потому что

$$(x^3)^{-4}=\frac{1}{(x^3)^4}=\frac{1}{x^{12}}=x^{-12}.$$

Примеры.

1) $(3a^{-2}b^2c^{-3})(0{,}8ab^{-3}c^4)=2{,}4a^{-1}b^{-1}c.$

2) $(x^{-1}y^3z^2):(5x^2y^{-2}z^3)={}^1/_5x^{-3}y^5z^{-1}.$

3) $(2ax^{-3})^{-2}=2^{-2}a^{-2}x^6.$

4) $(x^{-2}-y^{-1})^2=(x^{-2})^2-2x^{-2}y^{-1}+(y^{-1})^2=x^{-4}-2x^{-2}y^{-1}+y^{-2}.$

5) $(a^{-2}+b^{-3})(a^{-2}-b^{-3})=a^{-4}-b^{-6}.$

6) $\sqrt[3]{27p^{-9}q^{-3}}=3p^{-3}q^{-1}.$

Глава вторая.

Дробные показатели.

258. В каком смысле употребляются дробные показатели. Мы видели (§ 168, б), что при извлечении корня из степени делят показатель степени на показатель корня, если такое деление выполнится нацело; например: $\sqrt{a^4}=a^2$, $\sqrt[3]{x^9}=x^3$ и т. п. Условимся теперь распространить это правило и на те случаи, когда показатель степени не делится нацело на показатель корня. Например, мы условимся принимать, что

$$\sqrt{a}=a^{\frac{1}{2}};\quad \sqrt{x^3}=x^{\frac{3}{2}};\quad \sqrt[3]{z^5}=z^{\frac{5}{3}}.$$

Вообще мы условимся, что *выражение* $a^{\frac{m}{n}}$ *означает корень, показатель которого есть знаменатель, а показатель подкоренного числа — числитель дробного показателя* (т. е. $\sqrt[n]{a^m}$).

Условимся еще допускать и отрицательные дробные показатели в том же смысле, в каком мы допустили отрицательные целые показатели; например, условимся, что

$$a^{-\frac{3}{4}}=\frac{a^m}{o^{m+\frac{3}{4}}}=\frac{1}{a^{\frac{3}{4}}}=\frac{1}{\sqrt[4]{a^3}}\ ^{1)}$$

---

1) Замечание. Дробные показатели были введены в алгебру главным образом голландским инженером *Симоном Стевином* в начале XVII столетия Позднее, в конце XVII столетия, Оксфордский профессор *Джон Валлис* ввел в употребление отрицательные показатели.

259. Основное свойство дробного показателя. *Величина степени с дробным показателем не изменится, если мы умножим или разделим на одно и то же число (отличное от нуля) числитель и знаменатель дробного показателя. Так:*

$$a^{\frac{3}{2}}=a^{\frac{6}{4}}=a^{\frac{9}{6}}=\ldots;\qquad x^{\frac{4}{6}}=x^{\frac{2}{3}}.$$

Вообще

$$a^{\frac{m}{n}}=a^{\frac{mp}{np}}.$$

Действительно, знаменатель дробного показателя означает показатель корня, а числитель его означает показатель подкоренного выражения, а такие показатели, как мы видели (§ 202), можно умножать и делить на одно и то же число.

Основываясь на этом свойстве, мы можем *преобразовывать дробный показатель совершенно так же, как и обыкновенную дробь*; например, мы можем сокращать дробный показатель, или приводить несколько дробных показателей к одному знаменателю.

260. Действия над степенями с дробными показателями. Предстоит показать, что к дробным показателям применимы правила, выведенные раньше для целых показателей. Это достаточно обнаружить только для умножения и возвышения в степень, так как правила деления и извлечения корня составляют следствие правил умножения и возвышения в степень.

Умножение. Докажем, что при умножении показатели степеней одинаковых букв складываются и тогда, когда эти показатели дробные. Например, убедимся, что

$$a^{\frac{2}{3}}\cdot a^{\frac{4}{5}}=a^{\frac{2}{3}+\frac{4}{5}}=a^{\frac{10+12}{15}}=a^{\frac{22}{15}}.$$

Для этого изобразим степени с дробными показателями в виде радикалов и произведем умножение по правилу умножения радикалов (§ 205, б):

$$\sqrt[3]{a^2}\cdot\sqrt[5]{a^4}=\sqrt[15]{a^{10}}\cdot\sqrt[15]{a^{12}}=\sqrt[15]{a^{22}}=a^{\frac{22}{15}}.$$

Результат получился тот самый, какой мы получили после сложения показателей; значит, правило о сложении показателей (при умножении) можно применять и для дробных показателей.

Таким образом:

$$a^{\frac{1}{2}}\cdot a^{\frac{1}{3}}=a^{\frac{1}{2}+\frac{1}{3}}=a^{\frac{5}{6}};$$

$$a^{\frac{m}{n}}\cdot a^{\frac{p}{q}}=a^{\frac{m}{n}+\frac{p}{q}}=a^{\frac{mq+np}{nq}}.$$

Возвышение в степень. Докажем, что при возвышении степени в степень показатели этих степеней можно перемножить и тогда, когда эти показатели дробные. Напр., убедимся, что

$$\left(a^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{4}{5}}=a^{\frac{2}{3}\cdot\frac{4}{5}}=a^{\frac{8}{15}}.$$

Действительно, заменив радикалами степени с дробными показателями получим:

$$\sqrt[5]{\left(\sqrt[3]{a^2}\right)^4}=\sqrt[5]{\sqrt[3]{a^8}}=\sqrt[15]{a^8}=a^{\frac{8}{15}}.$$

Если показатели не только дробные числа, но и отрицательные, то и тогда к ним можно применять правила, доказанные раньше для положительных показателей. Напр.:

$$a^{-\frac{m}{n}}\cdot a^{-\frac{p}{q}}=\frac{1}{a^{\frac{m}{n}}}\cdot\frac{1}{a^{\frac{p}{q}}}=\frac{1}{a^{\frac{m}{n}+\frac{p}{q}}}=a^{-\left(\frac{m}{n}+\frac{p}{q}\right)}=$$

$$=a^{-\frac{m}{n}-\frac{p}{q}}=a^{-\frac{m}{n}+\left(-\frac{p}{q}\right)}.$$

261. Примеры на действия с дробными и отрицательными показателями.

$$1)\ \left(a^{\frac{1}{2}}+b^{\frac{1}{2}}-c^{\frac{1}{2}}\right)\left(a^{\frac{1}{2}}-b^{\frac{1}{2}}+c^{\frac{1}{2}}\right)=$$

$$=\left[a^{\frac{1}{2}}+\left(b^{\frac{1}{2}}-c^{\frac{1}{2}}\right)\right]\left[a^{\frac{1}{2}}-\left(b^{\frac{1}{2}}-c^{\frac{1}{2}}\right)\right]=a-\left(b^{\frac{1}{2}}-c^{\frac{1}{2}}\right)^2=$$

$$=a-b-c+2\,b^{\frac{1}{2}}c^{\frac{1}{2}}=a-b-c+2\sqrt{bc}.$$

$$2)\ \sqrt{12a^{-4}b^3}:\left[\left(\frac{a^3}{3b^{-4}}\right)^{-2}\right]^{\frac{1}{4}}=\left(2\cdot 3^{\frac{1}{2}}a^{-2}b^{\frac{3}{2}}\right):\frac{a^{-\frac{5}{2}}}{3^{-\frac{1}{2}}b^2}=$$

$$=2a^{\frac{1}{2}}b^{\frac{7}{2}}=2b^3\sqrt{ab}$$

Глава третья.

Некоторые свойства степени с рациональным показателем.

262. Допустим, что в степени a^x основание a есть какое-нибудь положительное число, большее или меньшее 1, а показатель x любое рациональное число, положительное или отрицательное, целое или дробное. Кроме того предположим, что когда x есть какая-нибудь дробь, напр., $^3/_2$, т. е. когда степень a^x представляет собою радикал $\sqrt{a^3}$, то из возможных значений этого радикала мы берем только одно арифметическое, т. е. положительное.

При этих условиях степень a^x обладает следующими свойствами:

а) *При всяком значении рационального показателя x степень a^x есть число положительное.*

Действительно, если x есть целое положительное число, напр. 3, то a^x представляет собой произведение aaa положительных чисел, и потому оно положительно.

Если x есть положительная дробь, напр. $^3/_2$, то a^x означает $\sqrt{a^3}$, а мы условились из всех значений радикала брать только положительное.

Если x есть отрицательное число, напр.— $^3/_4$, то

$$a^x = a^{-\frac{3}{4}} = \frac{1}{a^{\frac{3}{4}}},$$

и потому $a^x > 0$, так как $a^{\frac{3}{4}} > 0$.

Наконец, если $x = 0$, то $a^x = a^0 = 1$, т. е. тоже есть число положительное.

б) *Если $a > 1$, то при положительных значениях x степень a^x больше 1, а при отрицательных — меньше 1. Если же $a < 1$, то, наоборот, $a^x < 1$ при $x > 0$ и $a^x > 1$ при $x < 0$.*

Действительно, если x есть целое положительное число, напр. 3, то тогда $a^x = a^3 = aaa$. Очевидно, что если $a > 1$, то $aaa > 1$, а если $a < 1$, то $aaa < 1$.

Если x есть положительная дробь, напр. $^3/_4$, то тогда $a^x = a^{\frac{3}{4}} = \sqrt[4]{a^3}$. Если $a > 1$, то $a^3 > 1$, а если $a < 1$, то $a^3 < 1$. Но тогда в первом случае $\sqrt[4]{a^3} > \sqrt[4]{1}$, т. е. $\sqrt[4]{a^3} > 1$, а во втором случае $\sqrt[4]{a^3} < \sqrt[4]{1}$, т. е. $\sqrt[4]{a^3} < 1$.

Наконец, если x есть отрицательное число, напр. — 2, то тогда $a^x = a^{-2} = \frac{1}{a^2}$, и так как $a^2 > 1$ при $a > 1$ и $a^2 < 1$ при $a < 1$, то:

$$\frac{1}{a^2} < 1 \text{ при } a > 1 \text{ и } \frac{1}{a} > 1 \text{ при } a < 1.$$

в) *При возрастании показателя x степень a^x возрастает, если $a > 1$, и убывает, если $a < 1$.*

Пусть x имеет какое-нибудь определенное значение, напр. $x = 3$. Тогда степень a^x будет равна a^3. Увеличим теперь x на какое-нибудь число, напр., вместо 3 возьмем 3,01. Тогда вместо a^3 будем иметь $a^{3,01}$. Чтобы узнать, какое из этих двух чисел больше, возьмем разность $a^{3,01} - a^3$ и посмотрим, при каких условиях эта разность будет положительное число и при каких отрицательное. Разность эту можно представить так:

$$a^{3,01} - a^3 = a^3 (a^{0,01} - 1).$$

Согласно свойству (а) число $a^3 > 0$; согласно свойству (б) число $a^{0,01} > 1$ при $a > 1$ и $a^{0,01} < 1$ при $a < 1$. Следовательно, правая часть написанного равенства (значит, и его левая часть) при $a > 1$ положительна, а при $a < 1$ отрицательна. Поэтому в первом случае $a^{3,01} > a^3$, а во втором $a^{3,01} < a^3$.

г) *Если x стремится к ∞, то при $a > 1$ степень a^x стремится также к ∞, а при $a < 1$ она стремится к 0.*

Согласно свойству (в) при увеличении x степень a^x увеличивается, если $a > 1$, и уменьшается, если $a < 1$. Теперь мы покажем, что, увеличиваясь при $a > 1$, число a^x может сделаться больше всякого числа, как бы велико оно ни было, а уменьшаясь при $a < 1$, оно может сделаться меньше всякого положительного числа, как бы мало оно ни было. Для этого примем во внимание, что показатель x, увеличиваясь неограниченно, проходит, между прочим, через ряд целых значений: 1, 2, 3, 4,... Тогда степень a^x будет проходить через ряд таких значений:

$$a^1, a^2, a^3, a^4, \ldots$$

Ряд этот есть бесконечная Г. П. со знаменателем a. Если $a > 1$, то эта прогрессия возрастающая, а если $a < 1$, то она убывающая. Как мы видели (§ 251, б), в первом случае член прогрессии, удаляясь от начала ряда, может превзойти всякое число, как бы велико оно ни было: а во втором случае член прогрессии может сделаться меньше всякого положительного числа, как бы мало оно ни было. Значит, когда x стремится к ∞, то степень a^x тоже стремится к ∞, когда $a > 1$, и степень a^x стремится к 0, когда $a < 1$.

Таким образом, мы можем написать:

$$a^{\infty} = \infty, \text{ если } a > 1; \quad a^{\infty} = 0, \text{ если } a < 1.$$

д) *Если x стремится к $-\infty$, то степень a^x стремится к 1 при $a > 1$ и к ∞ при $a < 1$.*

Показатель x, уменьшаясь неограниченно, проходит, между прочим, ряд целых отрицательных значений: $-1, -2, -3, -4, \ldots$ Тогда степень a^x проходит ряд таких значений:

$$a^{-1}, a^{-2}, a^{-3}, a^{-4}, \ldots$$

т. е.

$$\frac{1}{a^1}, \frac{1}{a^2}, \frac{1}{a^3}, \frac{1}{a^4}, \ldots$$

Этот ряд есть бесконечная Г. П. со знаменателем $\frac{1}{a}$. Если $a > 1$, то $\frac{1}{a} < 1$, и тогда эта прогрессия убывающая, и потому член ее при неограниченном удалении от начала ряда стремится к 0; если же $a < 1$, то $\frac{1}{a} > 1$, и тогда прогрессия возрастающая и потому член ее, удаляясь от начала ряда, стремится к ∞.

Таким образом, мы можем написать:

$$a^{-\infty} = 0, \text{ если } a > 1; \; a^{-\infty} = \infty, \text{ если } a < 1.$$

е) *Если x стремится к нулю, то степень a^x стремится к 1 (и при $a > 1$, и при $a < 1$).*

Если x стремится к 0, то a^x стремится к a^0. Но что представляет собой в этом случае выражение a^0? До сего времени мы считали, что $a^0 = 1$. Но считая так, мы предполагали (§ 65), что выражение a^0 означает частное от деления одинаковых степеней буквы a. Но теперь выражение a^0 мы рассматриваем иначе, а именно, как предел, к которому стремится степень a^x, когда показатель x стремится к нулю. Будет ли этот предел 1, или нет, мы сейчас увидим.

Возьмем какое-нибудь основание, большее 1, напр. 10, и допустим, что показатель x все уменьшается, напр. переходит через такие значения:

$$x = \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{16} \text{ и т. д.}$$

(мы выбрали эти значения, так как при них удобно вычислять значения степени).

Тогда:

$$10^{\frac{1}{2}}=\sqrt{10}=3,162;\ 10^{\frac{1}{4}}=\sqrt[4]{10}=\sqrt{\sqrt{10}}=\sqrt{3,162}=1,778;$$

$$10^{\frac{1}{8}}=\sqrt[8]{10}=\sqrt{\sqrt[4]{10}}=\sqrt{1,778}=1,333;\ 10^{\frac{1}{16}}=\sqrt{1,333}=1,15\ ^{1)}.$$

Мы видим, что степень 10^x все уменьшается, приближаясь все ближе и ближе к 1 (извлечение следующего корня квадратного дало бы 1,07, дальше 1,03,...).

Возьмем теперь основание, меньшее 1, напр. $^1/_{10}$, и предположим, что x попрежнему уменьшается, переходя через значения $^1/_2$, $^1/_4$, $^1/_8$ и т. д. Тогда:

$$\left(\frac{1}{10}\right)^{\frac{1}{2}}=\sqrt{\frac{1}{10}}=\sqrt{\frac{10}{100}}=\frac{1}{10}\sqrt{10}=0,3162;$$

$$\left(\frac{1}{10}\right)^{\frac{1}{4}}=\sqrt{0,3162}=0,562;\quad \left(\frac{1}{10}\right)^{\frac{1}{8}}=\sqrt{0,562}=0,75;$$

$$\left(\frac{1}{10}\right)^{\frac{1}{16}}=\sqrt{0,75}=0,86.$$

Мы видим, что степень $\left(\frac{1}{10}\right)^x$ все увеличивается, приближаясь все ближе и ближе к 1 (дальнейшее извлечение корня дало бы 0,92, затем 0,96,...).

Удовольствуемся этими двумя примерами и примем, что

$$\text{пред. } a^x=1, \text{ если } x\to 0.$$

Изложим строгое доказательство этого предложения, т. е. докажем, что, когда x стремится к 0, абсолютная величина разности $1-a^x$ делается меньше любого данного положительного числа α. Предположим сначала, что $a>1$ и что x, приближаясь к 0, проходит только положительные значения. Возьмем бесконечную возрастающую Г. П.:

$$\div\div\ 1,\ (1+\alpha),\ \ (1+\alpha)^2,\ \ (1+\alpha)^3,\ldots(1+\alpha)^n\ldots$$

Член такой прогрессии, при достаточном его удалении от начала ряда, может превзойти любое данное число. Значит, при некотором достаточно большом n степень $(1+\alpha)^n$ превзойдет число a (как бы велико это число ни было). Тогда:

$$a<(1+\alpha)^n,$$

откуда:

$$\sqrt[n]{a}<\sqrt[n]{(1+\alpha)^n},\quad \text{т. е. } a^{\frac{1}{n}}<1+\alpha.$$

---

[1] Корни эти можно найти обыкновенным извлечением, но можно их получить и из таблицы квадратных корней, приложенной в конце этой книги.

Когда число x, приближаясь к 0, делается меньше дроби $\frac{1}{n}$, тогда a^x делается меньше $a^{\frac{1}{n}}$ [согласно свойству (в)]; следовательно, тогда

$$a^x < 1 + \alpha \text{ и, следовательно, } a^x - 1 < \alpha.$$

А это означает, что *пред.* $a^x = 1$, если $x \to 0$.

Положим теперь, что при $a > 1$ показатель x стремится к 0, оставаясь отрицательным (напр., x переходит через значения $-1/2, -1/4, -1/8$ и т. д.). Обозначив абсолютную величину отрицательного числа x буквою x', мы можем написать:

$$a^x = a^{-x'} = \frac{1}{a^{x'}}.$$

Когда x стремится к 0, тогда и x' стремится к 0, и потому степень $a^{x'}$, по доказанному сейчас, стремится к 1; значит, тогда дробь $\frac{1}{a^{x'}}$ стремится к $\frac{1}{1}$, т. е. к 1. Таким образом, и в этом случае *пред.* $a^x = 1$.

Допустим, наконец, что $a < 1$. Возьмем тогда вспомогательное число a', обратное числу a, т. е. число $a' = \frac{1}{a} > 1$. Тогда $a = \frac{1}{a'}$ и

$$a^x = \left(\frac{1}{a'}\right)^x = \frac{1}{(a')^x}.$$

Так как $a' > 1$, то, по доказанному сейчас, $(a')^x \to 1$, когда $x \to 0$; значит, $a^x \to \frac{1}{1} = 1$. Итак, во всех случаях $a^x \to 1$, если $x \to 0$.

Глава четвертая.

Понятие об иррациональном показателе.

263. Выражению a^α, в котором α какое-нибудь иррациональное число, придают смысл только тогда, когда основание степени a есть какое-нибудь *положительное число, не равное 1.* При этом могут представиться следующие 3 случая:

а) $a > 1$ и α положительное иррациональное число, напр. $10^{\sqrt{2}}$.

Обозначим через α_1 любое рациональное приближенное значение числа α, взятое с недостатком, и через α_2 любое приближенное рациональное значение числа α, взятое с избытком. Тогда степень a^α означает такое число, которое *больше всякой степени a^{α_1}, но меньше всякой степени a^{α_2}*. Напр. $10^{\sqrt{2}}$ означает такое число, которое больше каждого из чисел ряда:

$$10^{1.4},\ 10^{1.41},\ 10^{1.414},\ 10^{1.4142},$$

в котором показатели — десятичные приближенные значения $\sqrt{2}$ взятые с недостатком, но меньше каждого из чисел ряда:

$$10^{1,5},\ 10^{1,42},\ 10^{1,415},\ 10^{1,4143},$$

в котором показатели — десятичные приближения $\sqrt{2}$, взятые с избытком.

Таким образом, если иррациональное чисто α заключено между двумя рациональными числами α_1 и α_2, то и степень a^α заключена между степенями a^{α_1} и a^{α_2}.

б) $a<1$ и α попрежнему положительное иррациональное число, напр. $0,5^{\sqrt{2}}$.

Тогда под степенью a^α разумеют такое число, *которое меньше всякой степени a^{α_1}, но больше всякой степени a^{α_2}*. Так, $0,5^{\sqrt{2}}$ есть число, меньшее каждого из чисел ряда:

$$0,5^{1,4},\ 0,5^{1,41},\ 0,5^{1,414},\ 0,5^{1,4142},\ldots$$

но больше каждого из чисел ряда:

$$0,5^{1,5},\ 0,5^{1,42},\ 0,5^{1,415},\ 0,5^{1,4143},\ldots$$

в) $a \gtrless 1$ и α отрицательное иррациональное число: напр., $10^{-\sqrt{2}}, (1/2)^{-\sqrt{2}}$.

Тогда выражению a^α придают тот же смысл, какой имеют степени с отрицательными рациональными показателями. Так:

$$10^{-\sqrt{2}}=\frac{1}{10^{\sqrt{2}}};\ (1/2)^{-\sqrt{2}}=\frac{1}{(1/2)^{\sqrt{2}}}.$$

При подробном рассмотрении теории иррациональных показателей обнаруживается, что все свойства показателей рациональных применимы и к показателям иррациональным; так:

$$a^\alpha \cdot a^\beta = a^{\alpha+\beta};\quad (a^\alpha)^\beta = a^{\alpha\beta}.$$

Равным образом все свойства степеней с рациональными показателями, указанные нами в предыдущем параграфе, принадлежат и степеням с иррациональными показателями.

Глава пятая.

Показательная функция.

264. Определение. Показательной называется функция $y=a^x$, представляющая собою степень, у которой основание a есть постоянное положительное число, не равное 1, а показатель x — переменное число, могущее принимать всевозможные значения, положительные и отрицательные, целые и дробные, рациональные и иррациональные. При этом предполагается, что в том случае, когда x равен дроби и, следовательно, когда a^x означает радикал некоторой степени, то из всех значений радикала берется только одно арифметическое, т. е. положительное.

Основание a предполагается не равным 1, так как при $a=1$ степень a^x при всяком значении x равнялась бы 1, и тогда она не зависела бы от x. Основание a предполагается еще и положительным, так как при $a<0$ степень a^x для многих значений x не давала бы никакого вещественного числа. Напр., при $a=-4$ и при $x={}^1/_2$ степень a^x обратилась бы в $(-4)^{1/2}=\sqrt{-4}$, что составляет мнимое выражение.

Из того, что мы знаем о показателях степени, следует, что функция $y=a^x$ при всяком значении x возможна и имеет единственное значение (благодаря условию брать для радикалов только арифметическое значение).

Надо обратить еще внимание на то, что если показатель x изменяется очень немного, то и степень a^x изменяется тоже немного, и изменяется тем меньше, чем меньше изменение x. Напр., если x увеличим на какое-нибудь число α, то степень a^x сделается $a^{x+\alpha}$, и, следовательно, она изменится на разность $a^{x+\alpha}-a^x$, которую можно представить в виде произведения:

$$a^{x+\alpha}-a^x=a^x\,(a^\alpha-1).$$

Когда α будет уменьшаться, приближаясь к нулю, тогда, как мы видели, число a^α стремится к 1, и, значит, разность $a^\alpha-1$ будет стремиться к нулю. Так как при этом число a^x остается без изменения, то написанное нами произведение, в котором множимое остается без изменения, а множитель стремится к нулю, тоже стремится к нулю. Но это произведение выражает разность $a^{x+\alpha}-a^x$; значит, изменение степени a^x может быть, при достаточно малом α, как угодно мало; другими словами, функция a^x при непрерывном изменении x изменяется тоже непрерывно.

265. График показательной функции. Построим графики следующих трех показательных функций:

$$1)\ y=2^x;\quad 2)\ y=\left(\frac{1}{2}\right)^x;\quad 3)\ y=10^x.$$

Для построения графиков первых двух функций мы дадим переменному числу x ряд целых значений:

$$-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3.$$

При $x=-3$ мы получим.

$$2^{-3}=\frac{1}{2^3}=\frac{1}{8};\quad \left(\frac{1}{2}\right)^{-3}=1:\left(\frac{1}{2}\right)^3=1:\frac{1}{8}=8$$

Подобно этому вычислим значения y и для всех остальных значений x. Добавим еще предельные значения при $x=-\infty$ и при $x=\infty$. Согласно свойствам (г) и (д), указанным в § 262, мы будем иметь:

$$2^{-\infty}=0;\ \left(\frac{1}{2}\right)^{-\infty}=\infty;\ 2^{\infty}=\infty,\ \left(\frac{1}{2}\right)^{\infty}=0.$$

Для функции $y=10^x$ неудобно брать указанные значения числа x, так как мы получили бы тогда для y такие большие числа, которые на чертеже не умещаются (напр., при $x=3$ мы получили бы $y=10^3=1000$). Для этой функции мы возьмем такие дробные значение (заключающиеся между -1 и $+1$):

$$x=-1, -{}^3/_4, -{}^2/_4, -{}^1/_4, 0, {}^1/_4, {}^2/_4, {}^3/_4, 1.$$

Соответствующие значения y вычислим в такой последовательности:

$$10^{1/4}=\sqrt[4]{10}=\sqrt{\sqrt{10}}=\sqrt{3,162}=1,778;$$
$$10^{2/4}=10^{1/2}=\sqrt{10}=3,162\ ^{1)}.$$

Далее, простым умножением и делением находим:

$$10^{3/4}=10^{2/4}\cdot 10^{1/4}=3,162\cdot 1,778=5,62\ldots$$
$$10^{-1/4}=\frac{1}{1.778}=\frac{1000}{1778}=0,56\ldots$$
$$10^{-2/4}=\frac{1}{3,162}=\frac{1000}{3162}=0,32\ldots$$
$$10^{-3/4}=\frac{1}{5,62}=\frac{100}{562}=0,17\ldots$$

Выпишем все найденные значения в следующих трех таблицах:

1) $y=2^x$

$x=$	$-\infty$	возрастает	-3	-2	-1	0	1	2	3	возрастает	$+\infty$
$y=$	0	возрастает	$^1/_8$	$^1/_4$	$^1/_2$	1	2	4	8	возрастает	$+\infty$

---

1) Эти корни можно найти и по таблице квадратных корней, приложенной в конце этой книги.

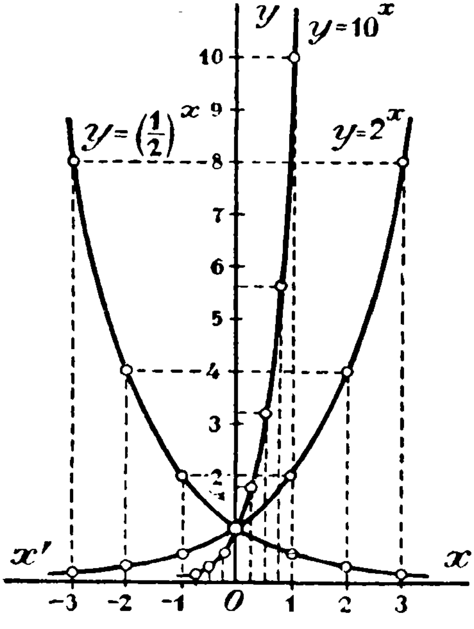
2) $y = (^1/_2)^x$

$x =$	$-\infty$	возрастает	-3	-2	-1	0	1	2	3	возрастает	$+\infty$
$y =$	$+\infty$	убывает	8	4	2	1	$^1/_2$	$^1/_4$	$^1/_8$	убывает	0

3) $y = 10^x$

$x =$	$-\infty$	возрастает	-1	$-^3/_4$	$-^2/_4$	$-^1/_4$	0	$^1/_4$	$^2/_4$	$^3/_4$	1	возрастает	∞
$y =$	0	возрастает	0,1	0,17	0,32	0,56	1	1,78	3,16	5,62	10	возрастает	0

(в последней таблице числа округлены).



Черт. 61.

Нанеся эти значения на чертеж (кроме, конечно, предельных) и проведя через полученные точки непрерывные кривые, мы получим (черт. 61) три графика взятых функций (всего удобнее чертеж выполнить на миллиметровой бумаге, беря за единицу длины сантиметр).

266. Свойства показательной функции. Рассматривая графики показательных функций, мы видим на них в наглядном изображении все те свойства степени a^x, которые были указаны ранее (§ 262).

Так:

1) При всяком основании функция a^x положительна (все кривые расположены выше оси x-ов).

2) При $a > 1$ функция $a^x > 1$, если $x > 0$, и $a^x < 1$, если $x < 0$; при $a < 1$ заключения обратны.

3) При возрастании x до $+\infty$ функция a^x возрастает до ∞, если $a > 1$, и убывает до 0, если $a < 1$ (но никогда, однако, нуля не достигает).

4) При убывании x до $-\infty$ функция a^x убывает, стремясь к 0, если $a > 1$, и возрастает до $+\infty$, если $a < 1$.

5) Если $x = 0$, то $a^x = 1$ при всяком a (все кривые проходят через одну и ту же точку, лежащую на оси y-ов на расстоянии от точки O на $+1$).

6) При $a > 1$ функция при возрастании x возрастает тем быстрее, чем больше a (кривая при $a = 10$ поднимается вверх значительно больше, чем при $a = 2$).

ОТДЕЛ ДВЕНАДЦАТЫЙ.

ЛОГАРИФМЫ.

Глава первая.

Общие свойства логарифмов.

267. Два действия, обратные возвышению в степень. Возьмем такие равенства:

$$2^3 = 2\cdot2\cdot2 = 8; \qquad 2^{\frac{3}{2}} = \sqrt{2^3} = \sqrt{8} = 2{,}828\ldots$$

$$2^{-2,5} = \frac{1}{2^{2,5}} = \frac{1}{2^{\frac{25}{10}}} = \frac{1}{2^{5/2}} = \frac{1}{\sqrt{2^5}} = \frac{1}{\sqrt{32}} =$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{64}} = \frac{\sqrt{2}}{8} = \frac{1{,}414}{8} = 0{,}1767\ldots$$

Эти три примера выражают собою различные случаи действия, называемого возвышением в степень. В этом действии даются: основание степени (число 2) и показатель степени (числа 3, $^3/_2$, $-2{,}5$), а требуется найти самую степень (8; 2,828; 0,1767). Посмотрим, какие есть действия, обратные возвышению в степень. Таких действий можно указать следующие два:

1) Пусть требуется узнать, какое число надо возвысить в степень с показателем 3, чтобы получить число 12. Обозначив искомое число буквою x, мы можем написать уравнение: $x^3 = 12$. Действие, посредством которого находится основание x по данной степени и данному показателю ее, называется извлечением корня; оно обозначается, как мы знаем, так:

$$x = \sqrt[3]{12}.$$

2) Положим, надо узнать, какой показатель должен быть у степени, в которую надо возвысить основание 4, чтобы полу-

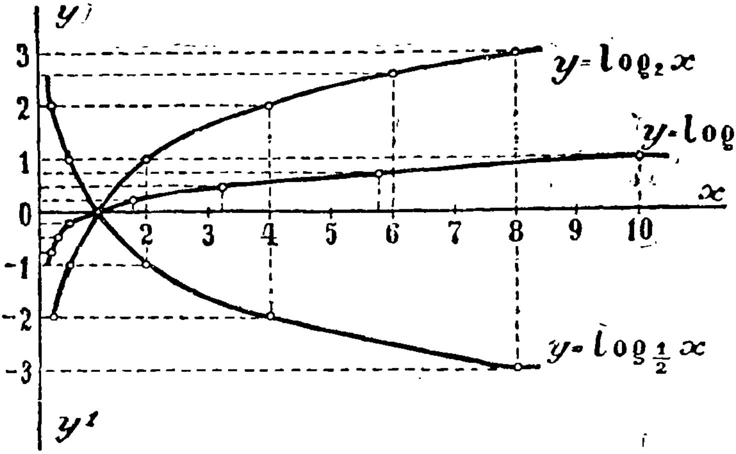
чить 16. Обозначив искомый показатель буквою x, можем написать уравнение: $4^x = 16$. Действие, посредством которого находится показатель степени по данной степени и данному основанию, называется **нахождением логарифма** данного числа (16) по данному основанию (4). В нашем примере $x = 2$, так как $4^2 = 16$.

Итак, возвышение в степень имеет два обратных действия. Поставим вопрос, различны ли эти действия? Ведь и для умножения можно усмотреть два обратных действия: первое — нахождение множимого по данным произведению и множителю, второе — нахождение множителя по данным произведению и множимому. Однако действия эти рассматриваются не как различные, а как одно и то же действие, называемое делением. Причина слияния этих двух обратных действий в одно заключается в переместительном свойстве умножения, по которому произведение не меняется от перемены мест множимого и множителя. В таком же положении находится и сложение (2 слагаемых); этому действию также можно указать два обратных действия — нахождение неизвестного числа (1-го слагаемого), к которому надо прибавить данное число (2-е слагаемое), чтобы получить данную сумму; другое — нахождение неизвестного числа (2-го слагаемого), которое надо прибавить к данному числу (к 1-му слагаемому), чтобы получить данную сумму. Однако эти два действия рассматриваются как одно, называемое вычитанием, вследствие того, что сложение обладает переместительным свойством, по которому сумма не зависит от порядка слагаемых. Если бы это свойство принадлежало также и возвышению в степень, то тогда и два указанных выше обратных действия составляли бы в сущности одно. Но возвышение в степень не обладает свойством переместительности; напр., 2^3 не равно 3^2, 10^2 не равно 2^{10} и т. д. Вследствие этого нахождение основания по данным показателю и степени (извлечение корня) существенно отличается от нахождения показателя по данным основанию и степени (нахождение логарифма).

Заметим, что последнее действие в элементарной алгебре подробно не рассматривается; указываются главным образом его практические применения.

268. Определение логарифма. *Логарифмом данного числа по данному основанию называется показатель степени, в которую надо возвысить это основание, чтобы получить данное число.*

Имея график логарифмической функции, мы можем при помощи его найти логарифм (приближенный) числа, помещающегося между взятыми для чертежа значениями x. Возьмем, напр., график функции $y=\log_2 x$ и найдем при его помощи $\log_2 6$. Для этого возьмем на чертеже абциссу, равную 6, и построим соответствующую ей ординату. Измерив эту ординату, найдем приблизительно 2,6; это и будет $\log 6$.



Черт. 62.

270. Свойства логарифмической функции. При рассмотрении начерченных графиков мы наглядно представляем себе следующие свойства логарифмов:

1) Так как графики всецело расположены направо от оси y-ов, то *отрицательные числа не имеют логарифмов* (вспомним, что при всяком значении x функция a^x положительна).

2) Всякой положительной абсциссе соответствует своя определенная ордината; значит, *всякое положительное число имеет логарифм.*

3) Все кривые пересекаются с осью x-ов в одной и той же точке, отстоящей от начала координат на $+1$. Это значит, что *при всяком основании логарифм единицы есть нуль* ($a^0=1$).

4) Когда $a>1$, то части кривых, соответствующие абсциссам, меньшим 1, лежат в угле xOy', а части кривых, соответствующие абсциссам, бо́льшим 1, расположены в угле xOy. Это значит, что *при основании, большем 1, логарифмы чисел, меньших 1, отрицательны, а логарифмы чисел, бо́льших 1, положительны.* Это вполне соответствует тому свойству показательной функции,

что при положительном значении x функция a^x больше 1, а при отрицательном — меньше 1 (если $a > 1$).

При $a < 1$ (напр. для кривой $y = \log_{1/2} x$) заключения противоположны этим.

5) *Логарифм самого основания равен 1*; так, на графике $y = \log_2 x$ видно, что абсциссе 2 соответствует ордината 1; на других графиках видно то же самое.

6) При основании, большем 1, ветви кривых, расположенные ниже оси x-ов, при уменьшении абсциссы от 1 до 0, приближаются к полуоси Oy' как угодно близко, никогда, однако, ее не достигая, а ветви тех же кривых, расположенные выше оси x-ов, при возрастании x от 1 до $+\infty$, поднимаются все выше и выше неограниченно. Это значит, что (при $a > 1$) *с возрастанием числа от 0 до 1 логарифм его возрастает от $-\infty$ до 0; с возрастанием числа от 1 до $+\infty$ логарифм его возрастает от 1 до $+\infty$*. Из этого между прочим следует, что *большему числу соответствует больший логарифм* (при основании, меньшем 1, заключение было бы обратное).

271. Понятие о значении логарифмических таблиц. Различные числа можно выражать *как степени одного и того же числа*, напр., как степени числа 10. Такие числа, как 10, 100, 1000... или 0,1, 0,01, 0,001 и т. п., выражаются, как степени 10 очень просто: $10 = 10^1$, $100 = 10^2$, $1000 = 10^3$,... $0{,}1 = 10^{-1}$, $0{,}01 = 10^{-2}$, $0{,}001 = 10^{-3}$ и т. п. Другие числа выразить степенью 10 затруднительно. Так, если требуется найти показатель степени, в которую нужно возвысить 10, чтобы получить число 5, то мы можем только сказать, что искомый показатель больше 0, но меньше 1, так как $10^0 = 1$, что меньше 5, а $10^1 = 10$, что больше 5; значит, показатель степени, в которую надо возвысить 10 для получения 5, должен быть некоторая положительная дробь меньшая 1. Мы можем даже сказать, что эта дробь больше $1/2$, но меньше $3/4$, так как $10^{1/2} = \sqrt{10} = 3{,}162$, что меньше 5, а $10^{3/4} = \sqrt[4]{10^3} = \sqrt[4]{1000} = \sqrt{\sqrt{1000}} = \sqrt{31{,}62} = 5{,}62$, что больше 5. Но найти точно показатель x, чтобы $10^x = 5$, очень затруднительно. Есть отделы математики, в которых указываются способы, как можно для всякого данного числа N найти такой показатель x, при котором степень 10^x или в точности равняется N, или отличается от этого числа как угодно мало. Ученые, пользуясь этими способами, составили так называемые логарифмические таблицы, в которых помещены различные числа и около каждого из этих чисел указан показатель степени (логарифм), в которую надо возвысить 10, чтобы получить это число. Разъясним, для какой цели могут служить такие таблицы.

Пусть требуется вычислить число x по формуле:

$$x=\sqrt[5]{40}.$$

Извлекать корень 5-й степени мы не умеем. В подобных случаях нам могут помочь логарифмические таблицы. Находим в этих таблицах число 40 и около него логарифм этого числа. Пусть это будет 1,6... Это значит, что

$$40=10^{1,6...},$$

и следовательно,

$$\sqrt[5]{40}=\sqrt[5]{10^{1,6...}}$$

Так как при извлечении корня из степени показатель подкоренного числа (какой бы он ни был) делится на показатели корня, то

$$\sqrt[5]{40}=\sqrt[5]{10^{1,6...}}=10^{\frac{1,6...}{5}}=10^{0,32..}$$

Теперь в тех же таблицах в столбце логарифмов находим 0,32 и около него соответствующее число, пусть это будет, положим, 2,09... Это и будет приближенное значение

$$\sqrt[5]{40}.$$

Мы вскоре увидим, что логарифмические таблицы во многих случаях позволяют производить такие действия над числами, которые без таблиц мы или совсем не могли бы выполнить (ка в примере, только что указанном), или на выполнение которы потребовалось бы очень много времени.

Теперь нам предстоит ознакомиться, во-первых, с тем, ка при совершении какого-либо действия над данными числам можно найти логарифм искомого числа при помощи логарифмов этих данных чисел (взятых из таблиц) и, во-вторых, ка найдя такой логарифм, отыскать по нему в таблицах искомо число.

272. Нахождение логарифма произведения, частного, степен и корня. а) Пусть требуется сделать умножение:

$$378\cdot45,2.$$

Попробуем выполнить это действие посредством логарифмов. Найдем в таблицах логарифмы чисел 378 и 45,2. Пусть они будут: 2,5775 и 1,6551 (по основанию 10). Это значит, что

$$378=10^{2,5775} \text{ и } 45,2=10^{1,655}.$$

и следовательно,

$$378\cdot45,2=10^{2,5775}\cdot10^{1,6551}.$$

Так как при умножении степеней одного и того же числа показатели этих степеней складываются (какие бы ни были эти показатели), то

$$378\cdot45,2=10^{2,5775+1,6551}=10^{4,2326}$$

Значит, логарифм произведения 377·45,2 есть число 4,2326, получившееся от сложения логарифмов данных сомножителей (по этому логарифму в таблицах найдем и само произведение).

Положим вообще, что N_1 и N_2 будут два числа, которых произведение требуется вычислить. Пусть мы нашли в таблицах логарифмы этих чисел x_1 и x_2. Основание этих логарифмов может быть число 10, но может быть и какое-нибудь другое число, которое мы обозначим a. Тогда мы будем иметь равенства:

$$N_1=a^{x_1},\ N_2=a^{x_2};\text{ следовательно, } N_1N_2=a^{x_1}\cdot a^{x_2}=a^{x_1+x_2}.$$

Отсюда видно, что $\log(N_1N_2)=x_1+x_2$. Но x_1 — это $\log N_1$, а x_2 — это $\log N_2$; значит:

$$\log(N_1N_2)=\log N_1+\log N_2,$$

т. е. *логарифм произведения* (по какому угодно основанию) *равен сумме логарифмов сомножителей* (взятых по тому же основанию).

Заключение это остается верным и тогда, когда сомножителей будет более 2, так как при умножении степеней одного и того же числа показатели их складываются и тогда, когда этих степеней будет более 2.

б) Положим, надо сделать деление:

$$5637:26,3.$$

Найдем в таблицах логарифмы этих чисел (напр. по основанию 10). Пусть $\log 5637=3,751$ и $\log 26,3=1,42$. Тогда:

$$5637=10^{3,751} \text{ и } 26,3=10^{1,42}.$$

Следовательно, $5637:26,3=10^{3,751}:10^{1,42}=10^{3,751-1,42}=10^{2,331}$.

Отсюда видно, что логарифм частного 5637:26,3 есть число 2,331, получившееся от вычитания логарифма делителя из логарифма делимого.

Вообще, если

$$N_1 = a^{x_1} \text{ и } N_2 = a^{x_2},$$

то

$$N_1 : N_2 = a^{x_1} : a^{x_2} = a^{x_1 - x_2},$$

и следовательно,

$$\log (N_1 : N_2) = x_1 - x_2 = \log N_1 - \log N_2,$$

т. е. *логарифм частного равен логарифму делимого без логарифма делителя.*

Так как всякая дробь есть частное от деления числителя на знаменатель, то *логарифм дроби равен логарифму числителя без логарифма знаменателя.* Напр.:

$$\log \frac{2}{3} = \log 2 - \log 3; \ \log 2\frac{3}{4} = \log \frac{11}{4} = \log 11 - \log 4;$$

$$\log 0{,}6 = \log 6 - \log 10.$$

в) Если $N = a^x$, то $N^n = (a^x)^n = a^{nx}$; следовательно:

$$\log (N^n) = nx = n \log N,$$

т е. *логарифм степени равен показателю этой степени, умноженному на логарифм возвышаемого числа.*

Напр.: $\log (15{,}3)^2 = 2 \log 15{,}3$; $\log 3^{-2} = -2 \log 3$.

г) Так как $\sqrt[n]{N} = N^{\frac{1}{n}}$, то, применяя правило о логарифме степени, получим:

$$\log \sqrt[n]{N} = \log N^{\frac{1}{n}} = \frac{1}{n} \log N = \frac{\log N}{n},$$

т. е. *логарифм корня равен логарифму подкоренного числа, деленному на показатель корня.*

273. Логарифмирование алгебраического выражения. Логарифмировать алгебраическое выражение значит выразить логарифм его посредством логарифмов отдельных чисел, составляющих это выражение. Выводы предыдущего параграфа позволяют это сделать в применении к произведению, частному, степени и дроби. Напр.:

$$1) \ \log \frac{2{,}5 \cdot 7^3}{0{,}28} = \log (2{,}5 \cdot 7^3) - \log 0{,}28 = \log 2{,}5 + \log 7^3 - \log 0{,}28 =$$

$$= \log 2{,}5 + 3 \log 7 - \log 0{,}28.$$

2) $\log \frac{5ac}{\sqrt{3}} = \log (5ax) - \log \sqrt{3} =$
$= \log 5 + \log a + \log x - {}^1/_2 \log 3.$

3) $\log (a^3\sqrt{5x}) = 3 \log a + {}^1/_2 (\log 5 + \log x) =$
$= 3 \log a + {}^1/_2 \log 5 + {}^1/_2 \log x.$

274. Замечания. а) Если в выражении, которое требуется вычислить, встречается *сумма* или *разность* чисел, то их надо находить без помощи таблиц обыкновенным сложением или вычитанием. Напр.:

$$\log (35 + 7{,}24)^5 = 5 \log (35 + 7{,}24) = 5 \log 42{,}24.$$

б) Умея логарифмировать выражения, мы можем, обратно, по данному результату логарифмирования найти то выражение, от которого получился этот результат; так, если

$$\log x = \log a + \log b - 3 \log c,$$

то легко сообразить, что

$$x = \frac{ab}{c^3}.$$

в) Прежде чем перейти к рассмотрению устройства логарифмических таблиц, мы укажем некоторые свойства десятичных логарифмов, т. е. таких, в которых за основание принято число 10 (только такие логарифмы употребляются для вычислений).

Глава вторая.

Свойства десятичных логарифмов.

275. а) Так как $10^1 = 10$, $10^2 = 100$, $10^3 = 1000$, $10^4 = 10\,000$ и т. д., то $\log 10 = 1$, $\log 100 = 2$, $\log 1000 = 3$, $\log 10\,000 = 4$, и т. д.

Значит, *логарифм целого числа, изображаемого единицею с нулями, есть целое положительное число, содержащее столько единиц, сколько нулей в изображении числа.*

Таким образом: $\log 100\,000 = 5$, $\log 1\,000\,000 = 6$, и т. д.

б) Так как

$$10^{-1} = \frac{1}{10} = 0{,}1; \quad 10^{-2} = \frac{1}{10^2} = 0{,}01;$$

$$10^{-3} = \frac{1}{10^3} = 0{,}001; \quad 10^{-4} = 0{,}0001 \text{ и т. д.,}$$

то:

$\log 0{,}1 = -1$; $\log 0{,}01 = -2$; $\log 0{,}001 = -3$; $\log 0{,}0001 = -4$, и т. д.

Значит, *логарифм десятичной дроби, изображаемой единицею с предшествующими нулями, есть целое отрицательное число содержащее столько отрицательных единиц, сколько нулей в изображении дроби, считая в том числе и 0 целых.*

Таким образом: $\log 0{,}00001 = -5$, $\log 0{,}000001 = -6$, и т. д.

в) Возьмем целое число, не изображаемое единицею с нулями, напр. 35, или целое число с дробью, напр. 10,7. Логарифм такого числа не может быть целым числом, так как, возвысив 10 в степень с целым показателем (положительным или отрицательным), мы получим 1 с нулями (следующими за 1, или ей предшествующими). Предположим теперь, что логарифм такого числа есть какая-нибудь дробь $\frac{a}{b}$. Тогда мы имели бы равенства:

$$10^{\frac{a}{b}} = 35; \quad \sqrt[b]{10^a} = 35; \quad 10^a = 35^b;$$

или

$$10^{\frac{a}{b}} = 10{,}7; \quad \sqrt[b]{10^a} = 10{,}7; \quad 10^a = 10{,}7^b.$$

Но эти равенства невозможны, так как 10^a есть 1 с нулями, тогда как степени 35^b и $10{,}7^b$ ни при каком показателе b не могут дать 1 с нулями. Значит, нельзя допустить, чтобы $\log 35$ и $\log 10{,}7$ были равны дробям. Но из свойств логарифмической функции мы знаем (§ 270, 2), что всякое положительное число имеет логарифм; следовательно, каждое из чисел 35 и 10,7 имеет свой логарифм, и так как он не может быть ни числом целым, ни числом дробным, то он есть число иррациональное и, следовательно, не может быть выражен точно посредством цифр. Обыкновенно иррациональные логарифмы выражают приближенно в виде десятичной дроби с несколькими десятичными знаками. Целое число этой дроби (хотя бы это было „0 целых“) называется характеристикой, а дробная часть — мантиссой логарифма. Если, напр., логарифм есть 1,5441, то характеристика его равна 1, а мантисса есть 0,5441.

г) Возьмем какое-нибудь целое или смешанное число, напр. 623 или 623,57. Логарифм такого числа состоит из характеристики и мантиссы. Оказывается, что десятичные логарифмы обладают тем удобством, что *характеристику их мы всегда можем найти по одному виду числа.* Для этого сосчитаем, сколько цифр в данном целом числе, или в целой части смешанного числа. В наших примерах этих цифр 3. Поэтому каждое из чисел 623 и 623,57 больше 100, но меньше 1000; значит, и логарифм каждого из них больше $\log 100$, т. е. больше 2, но меньше $\log 1000$, т. е. меньше 3 (вспомним, что большее число имеет и больший логарифм). Следовательно, $\log 623 = 2,\ldots$, и $\log 623{,}57 = 2,\ldots$ (точки заменяют собою неизвестные мантиссы).

Подобно этому найдем:

$10 < 56{,}7 < 100$	$1000 < 8634 < 10\,000$
$1 < \log 56{,}7 < 2$	$3 < \log 8634 < 4$
$\log 56{,}7 = 1,\ldots$	$\log 8634 = 3,\ldots$

Пусть вообще в данном целом числе, или в целой части данного смешанного числа, содержится m цифр. Так как самое малое целое число, содержащее m цифр, есть 1 с $m-1$ нулями на конце, то (обозначая данное число N) можем написать неравенства:

$$\overbrace{1000\,.\,.\,.\,0}^{m-1\ \text{нулей}} < N < \overbrace{1000\,.\,.\,.\,0}^{m\ \text{нулей}},$$

и следовательно,

$$m \quad 1 < \log N < m,$$

и потому

$$\log N = (m-1) + \text{положительная дробь.}$$

Значит, характеристика $\log N = m - 1$.

Мы видим таким образом, что *характеристика логарифма целого или смешанного числа содержит столько положительных единиц, сколько цифр в целой части числа без одной.*

Заметив это, мы можем прямо писать: $\log 7{,}205 = 0,\ldots$; $\log 83 = 1,\ldots$; $\log 720{,}1 = 2,\ldots$ и т. п.

д) Возьмем несколько десятичных дробей, меньших 1 (т. е. имеющих 0 целых): 0,35; 0,07; 0,0056; 0,0008, и т. п.

Очевидно, что	Следовательно
$0{,}1 < 0{,}35 < 1$	$-1 < \log 0{,}35 < 0$
$0{,}01 < 0{,}07 < 0{,}1$	$-2 < \log 0{,}07 < -1$
$0{,}001 < 0{,}0056 < 0{,}01$	$-3 < \log 0{,}0056 < -2$
$0{,}0001 < 0{,}0008 < 0{,}001$	$-4 < \log 0{,}0008 < -3$

Таким образом, каждый из этих логарифмов заключен между двумя целыми отрицательными числами, различающимися на одну единицу; поэтому каждый из них равен меньшему из этих отрицательных чисел, увеличенному на некоторую положительную дробь. Напр., $\log 0{,}0056 = -3 +$ положительная дробь. Предположим, что эта дробь будет 0,7482. Тогда, значит:

$$\log 0{,}0056 = -3 + 0{,}7482 \ (= -2{,}2518).$$

Такие суммы, как $-3+0{,}7482$, состоящие из целого отрицательного числа и положительной десятичной дроби, условились при логарифмических вычислениях писать сокращенно так: $\bar{3},7482$ [1]), т. е. ставят знак минус *над характеристикой* с целью показать, что он относится только к этой характеристике, а не к мантиссе, которая остается положительной. Таким образом, из приведенной выше таблички видно, что

$$\log 0{,}35 = \bar{1},\ldots;\ \log 0{,}07 = \bar{2},\ldots;\ \log 0{,}0008 = \bar{4},\ldots$$

Пусть вообще $A = \overbrace{0{,}000\ldots.0}^{m \text{ нулей}}\alpha\beta\ldots$ есть десятичная дробь, у которой перед первой значащей цифрой α стоит m нулей, считая в том числе и 0 целых. Тогда, очевидно, что

$$\overbrace{0{,}000\ldots.0}^{m \text{ нулей}}1 < A < \overbrace{0{,}000\ldots.0}^{m-1 \text{ нулей}}1\ldots$$

$$\text{Следовательно, } \log \overbrace{0{,}000\ldots0}^{m \text{ нулей}}1 < \log A < \log \overbrace{0{,}000\ldots0}^{m-1 \text{ нулей}}1,$$

т. е.

$$-m < \log A < -(m-1).$$

Так как из двух целых чисел: $-m$ и $-(m-1)$ меньшее есть $-m$, то

$$\log A = -m + \text{положительная дробь},$$

и потому характеристика $\log A = -m$ (при положительной мантиссе).

Таким образом, *характеристика логарифма десятичной дроби, меньшей 1, содержит в себе столько отрицательных единиц, сколько нулей в изображении десятичной дроби перед первой значащей цифрой, считая в том числе и нуль целых; мантисса же такого логарифма положительна.*

е) Умножим какое-нибудь число N (целое или дробное — все равно) на 10, на 100 на 1000..., вообще на 1 с нулями. Посмотрим, как от этого изменится $\log N$. Так как логарифм произведения равен сумме логарифмов сомножителей, то

$$\log(N\cdot 10) = \log N + \log 10 = \log N + 1;$$
$$\log(N\cdot 100) = \log N + \log 100 = \log N + 2;$$
$$\log(N\cdot 1000) = \log N + \log 1000 = \log N + 3, \text{ и т. д.}$$

Когда к $\log N$ мы прибавляем какое-нибудь целое число, то это число мы может всегда прибавлять к характеристике, а не к мантиссе. Так, если $\log N = 2{,}7804$, то $2{,}7804 + 1 = 3{,}7804$; $2{,}7804 + 2 = 4{,}7804$ и т. п.; или если $\log N = \bar{3},5649$, то $\bar{3},5649 + 1 = \bar{2},5649$· $\bar{3}\,5649 + 2 = \bar{1},5649$, и т. п. Поэтому:

---

[1]) Такое число читается: 3 с минусом, 7482 десятитысячных.

От умножения числа на 10, 100, 1000,..., вообще на 1 с нулями, мантисса логарифма не изменяется, а характеристика увеличивается на столько единиц, сколько нулей во множителе.

Подобно этому, приняв во внимание, что логарифм частного равен логарифму делимого без логарифма делителя, мы получим:

$$\log\frac{N}{10}=\log N-\log 10=\log N-1;$$

$$\log\frac{N}{100}=\log N-\log 100=\log N-2;$$

$$\log\frac{N}{1000}=\log N-\log 1000=\log N-3,\ \text{и т. п.}$$

Если условимся при вычитании целого числа из логарифма вычитать это целое число всегда из характеристики, а мантиссу оставлять без изменения, то можно сказать:

От деления числа на 1 с нулями мантисса логарифма не изменяется, а характеристика уменьшается на столько единиц, сколько нулей в делителе.

276. Следствия. Из свойства (е) можно вывести следующие два следствия: а) *Мантисса логарифма десятичного числа не изменяется от перенесения в числе запятой*, потому что перенесение запятой равносильно умножению или делению на 10, 100, 1000 и т. д. Таким образом, логарифмы чисел:

0,00423, 0,0423, 4,23, 423

отличаются только характеристиками, но не мантиссами (при условии, что все мантиссы положительны).

б) *Мантиссы чисел, имеющих одну и ту же значащую часть, но отличающихся только нулями на конце, одинаковы:* так, логарифмы чисел: 23, 230, 2300, 23 000 отличаются только характеристиками.

Замечание. Из указанных свойств десятичных логарифмов видно, что характеристику логарифма целого числа и десятичной дроби мы можем находить без помощи таблиц (в этом заключается большое удобство десятичных логарифмов); вследствие этого в логарифмических таблицах помещаются только одни мантиссы; кроме того, так как нахождение логарифмов дробей сводится к нахождению логарифмов целых чисел (логарифм дроби = логарифму числителя без логарифма знаменателя), то в таблицах помещаются мантиссы логарифмов только целых чисел.

Глава третья.

Устройство и употребление четырехзначных таблиц.

277. Системы логарифмов. Системою логарифмов называется совокупность логарифмов, вычисленных для ряда последовательных целых чисел по одному и тому же основанию. Употребительны две системы: система обыкновенных или десятичных логарифмов, в которых за основание взято число 10, и система так называемых натуральных логарифмов, в которых за основание (по некоторым причинам, которые уясняются в других отделах математики) взято иррациональное число 2,7182818... Для вычислений употребляются десятичные логарифмы, вследствие тех удобств, которые были нами указаны, когда мы перечисляли свойства таких логарифмов.

Натуральные логарифмы называются также Неперовыми по имени изобретателя логарифмов, шотландского математика *Непера* (1550—1617 гг.), а десятичные логарифмы — Бригговыми по имени профессора *Бригга* (современника и друга Непера), впервые составившего таблицы этих логарифмов [1].

278. Преобразование отрицательного логарифма в такой, у которого мантисса положительна, и обратное преобразование. Мы видели, что логарифмы чисел, меньших 1, отрицательны. Значит, они состоят из отрицательной характеристики и отрицательной мантиссы. Такие логарифмы всегда можно преобразовать так, что у них мантисса будет положительная, а характеристика останется отрицательной. Для этого достаточно прибавить к мантиссе положительную единицу, а к характеристике — отрицательную (от чего, конечно, величина логарифма не изменится). Если, напр., мы имеем логарифм $-2{,}0873$, то можно написать:

$$-2{,}0873 = -2 - 1 + 1 - 0{,}0873 = -(2+1) + (1 - 0{,}0873) = \\ = -3 + 0{,}9127,$$

---

[1] Должно однако заметить, что Неперовы логарифмы не тождественны натуральным, а только связаны с ними некоторым соотношением. Впервые натуральные логарифмы были введены после смерти *Непера* в 1619 г. учителем математики в Лондоне, *Джоном Спейделем*. В следующем, 1620, году швейцарец *Бюрги* опубликовал свои таблицы, составленные им независимо от *Непера*.

Заметим, что в 1914 году исполнилось трехсотлетие изобретения логарифмов, так как таблицы Непера были им опубликованы в 1614 году (под названием „*Mirifici logarithmorum canonis descriptio*“).

или сокращенно:

$$-2{,}0873 = -\overset{-1\ +1}{2{,}0873} = \bar{3}{,}9127.$$

Обратно, всякий логарифм с отрицательной характеристикой и положительной мантиссой можно превратить в отрицательный. Для этого достаточно к положительной мантиссе приложить отрицательную единицу, а к отрицательной характеристике — положительную[1]): так, можно написать:

$$\bar{7}{,}8302 = \overset{+1\ -1}{\bar{7}{,}8302} = -6{,}1698.$$

279. Описание четырехзначных таблиц. Для решения большинства практических задач вполне достаточны четырехзначные таблицы, обращение с которыми весьма просто[2]). Таблицы эти (с надписью на верху их „логарифмы“) помещены в конце этой книги, а небольшая часть их (для объяснения расположения) напечатана на этой странице. В них содержатся мантиссы

Логарифмы.

	0	1	2	. 3	4	5	6	7	8	9	1 2 3	4 5 6	7 8 9
50	6990	6998	7007	7016	7024	7033	7042	7050	7059	7067	1 2 3	3 4 5	6 7 8
51	7076	7084	7093	7101	7110	7118	7126	7135	7143	7152	1 2 3	3 4 5	6 7 8
52	7160	7168	7177	7185	7193	7202	7210	7218	7226	7235	1 2 2	3 4 5	6 7 7
53	7243	7251	7259	7267	7275	7284	7292	7300	7308	7316	1 2 2	3 4 5	6 6 7
54	7324	7332	7340	7348	7356	7364	7372	7380	7388	7396	1 2 2	3 4 5	6 6 7
55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

---

[1]) Для выполнения этих преобразований приходится прибавить + 1 и —1— одно из этих чисел к характеристике, а другое к мантиссе. Чтобы не ошибиться, к чему прибавить + 1 и к чему — 1, полезно всегда обращать внимание на мантиссу заданного логарифма и рассуждать так: пусть в заданном логарифме мантисса отрицательна, а надо ее сделать положительной; тогда к ней, конечно, следует прибавить + 1, а потому к характеристике надо прибавить —1; пусть в заданном логарифме мантисса будет положительна, а надо ее сделать отрицательной (весь логарифм должен быть отрицательный). тогда к ней следует добавить — 1, а, следовательно, к характеристике + 1.

[2]) В случаях, требующих большой точности, пользуются пятизначными таблицами и иногда семизначными (напр. „Логарифмически-тригонометрическое руководство“ бар. *Георга Вега)*. Способ пользования такими таблицами объяснен во введении к ним.

логарифмов всех целых чисел от 1 до 9999 включительно, вычисленные с четырьмя десятичными знаками, причем последний из этих знаков увеличен на 1 во всех тех случаях, когда 5-й десятичный знак должен был бы оказаться 5 или более 5; следовательно, 4-значные таблицы дают приближенные мантиссы с точностью до $^1/_2$ десятитысячной доли (с недостатком или с избытком).

Так как характеристику логарифма целого числа или десятичной дроби мы можем, на основании свойств десятичных логарифмов, проставить непосредственно, то из таблиц мы должны взять только мантиссы; при этом надо вспомнить, что положение запятой в десятичном числе, а также число нулей, стоящих в конце числа, не имеют влияния на величину мантиссы. Поэтому при нахождении мантиссы по данному числу мы отбрасываем в этом числе запятую, а также и нули на конце его, если таковые есть, и находим мантиссу образовавшегося после этого целого числа. При этом могут представиться следующие случаи.

1) *Целое число состоит из 3-х цифр.* Напр., пусть надо найти мантиссу логарифма числа 536. Первые две цифры этого числа, т. е. 53, находим в таблицах в первом слева вертикальном столбце (см. таблицу, напечатанную на предыдущей странице). Найдя число 53, продвигаемся от него по горизонтальной строке вправо до пересечения этой строчки с вертикальным столбцом, проходящим через ту из цифр 0, 1, 2, 3,... 9, поставленных наверху (и внизу) таблицы, которая представляет собою 3-ю цифру данного числа, т. е. в нашем примере цифру 6. В пересечении получим мантиссу 7292 (т. е. 0,7292), принадлежащую логарифму числа 536. Подобно этому для числа 508 найдем мантиссу 0,7059, для числа 500 найдем 0,6990 и т. п.

2) *Целое число состоит из 2-х или из 1-й цифры.* Тогда мысленно приписываем к этому числу один или два нуля и находим мантиссу для образовавшегося таким образом трехзначного числа. Напр., к числу 51 приписываем один нуль, от чего получаем 510 и находим мантиссу 7076; к числу 5 приписываем 2 нуля и находим мантиссу 6990 и т. д.

3) *Целое число выражается 4 цифрами.* Напр., надо найти мантиссу log 5436. Тогда сначала находим в таблицах, как было сейчас указано, мантиссу для числа, изображенного первыми 3-мя цифрами данного числа, т. е. для 543 (эта мантисса будет 7348); затем продвигаемся от найденной мантиссы по горизон-

тальной строке направо (в правую часть таблицы, расположенную за жирной вертикальной чертой) до пересечения с вертикальным столбцом, проходящим через ту из цифр: 1, 2 3,... 9, стоящих наверху (и внизу) этой части таблицы, которая представляет собою 4-ю цифру данного числа, т. е. в нашем примере цифру 6. В пересечении находим поправку (число 5). которую надо приложить в уме к мантиссе 7348, чтобы получить мантиссу числа 5436; мы получим таким образом мантиссу 0,7353.

4) *Целое число выражается 5-ю или более цифрами.* Тогда отбрасываем все цифры, кроме первых 4-х, и берем приближенное четырехзначное число, причем последнюю цифру этого числа увеличиваем на 1 в том случае, когда отбрасываемая 5-я цифра числа есть 5 или больше 5. Так, вместо 57842 мы берем 5784, вместо 30257 берем 3026, вместо 583263 берем 5833 и т. п. Для этого округленного четырехзначного числа находим мантиссу так, как было сейчас объяснено.

Руководствуясь этими указаниями, найдем для примера логарифмы следующих чисел:

36,5; 804,7; 0,26; 0,00345; 7,2634; 3456,06.

Прежде всего, не обращаясь пока к таблицам, проставим одни характеристики, оставляя место для мантисс, которые выпишем после:

$\log 36{,}5 = 1,\dots$ $\qquad$ $\log 0{,}00345 = \bar{3},\dots$
$\log 804{,}7 = 2,\dots$ $\qquad$ $\log 7{,}2634 = 0,\dots$
$\log 0{,}26 = \bar{1},\dots$ $\qquad$ $\log 3456{,}86 = 3,\dots$

Далее по таблицам выставляем прямо мантиссы:

$\log 36{,}5 = 1{,}5623;$ $\qquad$ $\log 0{,}00345 = \bar{3}{,}5378;$
$\log 804{,}7 = 2{,}9057;$ $\qquad$ $\log 7{,}2634 = 0{,}8611;$
$\log 0{,}26 = \bar{1}{,}4150;$ $\qquad$ $\log 3456{,}86 = 3{,}5387.$

280. Замечание. В некоторых четырехзначных таблицах (напр. в таблицах *В. Лорченко* и *Н. Оглоблина*, *С. Глазенапа*, *Н. Каменьщикова)* поправки на 4-ю цифру данного числа не помещены. Имея дело с такими таблицами, приходится поправки эти находить при помощи простого вычисления, которое можно выполнять на основании следующей истины: если числа превосходят 100, а разности между ними меньше 1, то без чувствительной погрешности можно принять, что *разности между* логарифмов всех целых чисел от 1 до 9999 включительно, в численные с четырьмя десятичными знаками, причем послед ний из этих знаков увеличен на 1 во всех тех случаях, когд 5-й десятичный знак должен был бы оказаться 5 или более следовательно, 4-значные таблицы дают приближенные мантисс с точностью до $^1/_2$ десятитысячной доли (с недостатком ил с избытком).

Так как характеристику логарифма целого числа или деся тичной дроби мы можем, на основании свойств десятичны логарифмов, проставить непосредственно, то из таблиц м должны взять только мантиссы; при этом надо вспомнить, чт положение запятой в десятичном числе, а также число нулей стоящих в конце числа, не имеют влияния на величину ман тиссы. Поэтому при нахождении мантиссы по данному числ мы отбрасываем в этом числе запятую, а также и нули н конце его, если таковые есть, и находим мантиссу образова шегося после этого целого числа. При этом могут представитьс следующие случаи.

1) *Целое число состоит из 3-х цифр.* Напр., пусть надо найти мантиссу логарифма числа 536. Первые две цифры этого числа, т. е. 53, находим в таблицах в первом слева вертикальном столбце (см. таблицу, напечатанную на предыдущей странице). Найдя число 53, продвигаемся от него по горизонтальной строке вправо до пересечения этой строчки с вертикальным столбцом, проходящим через ту из цифр 0, 1, 2, 3,... 9, поставленных наверху (и внизу) таблицы, которая представляет собою 3-ю цифру данного числа, т. е. в нашем примере цифру 6. В пересечении получим мантиссу 7292 (т. е. 0,7292), принадлежащую логарифму числа 536. Подобно этому для числа 508 найдем мантиссу 0,7059, для числа 500 найдем 0,6990 и т. п.

2) *Целое число состоит из 2-х или из 1-й цифры.* Тогда мысленно приписываем к этому числу один или два нуля и находим мантиссу для образовавшегося таким образом трехзначного числа. Напр., к числу 51 приписываем один нуль, от чего получаем 510 и находим мантиссу 7076; к числу 5 приписываем 2 нуля и находим мантиссу 6990 и т. д.

3) *Целое число выражается 4 цифрами.* Напр., надо найти мантиссу log 5436. Тогда сначала находим в таблицах, как было сейчас указано, мантиссу для числа, изображенного первыми 3-мя цифрами данного числа, т. е. для 543 (эта мантисса будет 7348); затем продвигаемся от найденной мантиссы по горизон-

тальной строке направо (в правую часть таблицы, расположенную за жирной вертикальной чертой) до пересечения с вертикальным столбцом, проходящим через ту из цифр: 1, 2 3,... 9, стоящих на верху (и в низу) этой части таблицы, которая представляет собою 4-ю цифру данного числа, т. е. в нашем примере цифру 6. В пересечении находим поправку (число 5), которую надо приложить в уме к мантиссе 7348, чтобы получить мантиссу числа 5436; мы получим таким образом мантиссу 0,7353.

4) *Целое число выражается 5-ю или более цифрами.* Тогда отбрасываем все цифры, кроме первых 4-х, и берем приближенное четырехзначное число, причем последнюю цифру этого числа увеличиваем на 1 в том случае, когда отбрасываемая 5-я цифра числа есть 5 или больше 5. Так, вместо 57842 мы берем 5784, вместо 30257 берем 3026, вместо 583263 берем 5833 и т. п. Для этого округленного четырехзначного числа находим мантиссу так, как было сейчас объяснено.

Руководствуясь этими указаниями, найдем для примера логарифмы следующих чисел:

36,5; 804,7; 0,26; 0,00345; 7,2634; 3456,06.

Прежде всего, не обращаясь пока к таблицам, проставим одни характеристики, оставляя место для мантисс, которые выпишем после:

$\log 36{,}5 = 1,....$ $\qquad$ $\log 0{,}00345 = \overline{3},....$

$\log 804{,}7 = 2,....$ $\qquad$ $\log 7{,}2634 = 0,....$

$\log 0{,}26 = \overline{1},....$ $\qquad$ $\log 3456{,}86 = 3,....$

Далее по таблицам выставляем прямо мантиссы:

$\log 36{,}5 = 1{,}5623;$ $\qquad$ $\log 0{,}00345 = \overline{3}{,}5378;$

$\log 804{,}7 = 2{,}9057;$ $\qquad$ $\log 7{,}2634 = 0{,}8611;$

$\log 0{,}26 = \overline{1}{,}4150;$ $\qquad$ $\log 3456{,}86 = 3{,}5387.$

280. Замечание. В некоторых четырехзначных таблицах (напр. в таблицах *В. Лорченко* и *Н. Оглоблина*, *С. Глазенапа*, *Н. Каменьщикова)* поправки на 4-ю цифру данного числа не помещены. Имея дело с такими таблицами, приходится поправки эти находить при помощи простого вычисления, которое можно выполнять на основании следующей истины: если числа превосходят 100, а разности между ними меньше 1, то без чувствительной погрешности можно принять, что *разности между* *логарифмами пропорциональны разностям между соответствующими числами*[1]. Пусть, напр., надо найти мантиссу, соответствующую числу 5367. Мантисса эта, конечно, та же самая, что и для числа 536,7. Находим в таблицах для числа 536 мантиссу 7292. Сравнивая эту мантиссу с соседней вправо мантиссой 7300, соответствующей числу 537, мы замечаем, что если число 536 увеличится на 1, то мантисса его увеличится на 8 десятитысячных (8 есть так называемая табличная разность между двумя соседними мантиссами); если же число 536 увеличится на 0,7, то мантисса его увеличится не на 8 десятитысячных, а на некоторое меньшее число x десятитысячных, которое, согласно допущенной пропорциональности, должно удовлетворять пропорции:

$$x:8 = 0{,}7:1; \text{ откуда } x = 8\cdot 07 = 5{,}6,$$

что по округлении составляет 6 десятитысячных. Значит, мантисса для числа 536,7 (и следовательно, для числа 5367) будет: $7292 + 6 = 7298$.

Заметим, что нахождение по двум рядом стоящим в таблицах числам промежуточного числа называется интерполированием. Интерполирование, описанное здесь, называется пропорциональным, так как оно основано на допущении, что изменение логарифма пропорционально изменению числа. Оно называется также линейным, так как предполагает, что графически изменение логарифмической функции выражается прямою линией.

281. Предел погрешности приближенного логарифма. Если число, которого логарифм отыскивается, есть число точное, то за предел погрешности его логарифма, найденного по 4-значным таблицам, можно, как мы говорили в § 279, принять $1/2$ десятитысячной доли. Если же данное число не точное, то к этому пределу погрешности надо еще добавить предел другой погрешности, происходящей от неточности самого числа. Доказано (мы опускаем это доказательство), что за такой предел можно принять произведение

---

[1] Рассматривая график логарифмической функции $y = \log_{10} x$ (стр. 292), мы замечаем, что даже для чисел небольших (напр. для чисел от 3 до 10) график очень мало отличается от прямой линии. Если бы этот график продолжить направо для чисел от 10 до 100 (т. е. на 90 единиц длины вдоль оси x-ов), то ординаты возросли бы только от 1 до 2 (так как $\log 10 = 1$, а $\log 100 = 2$); при дальнейшем его продолжении для чисел от 100 до 1000 (т. е. на 900 единиц длины) ординаты увеличились бы снова только на 1 единицу. Значит, для чисел, больших 100, без чувствительной ошибки можно принять, что график функции $y = \log_{10} x$ совпадает с прямой. Но допустить это — значит принять, что для таких чисел приращения ординат пропорциональны приращениям абсцисс, т. е., другими словами, что разности между логарифмами пропорциональны разностям между числами.

$$a(d+1) \text{ десятитысячных,}$$

в котором a есть предел погрешности самого неточного числа в предположении, что *в его целой части взяты 3 цифры*, а d табличная разность мантисс, соответствующих двум последовательным трехзначным числам, между которыми заключается данное неточное число. Таким образом предел окончательной погрешности логарифма выразится тогда формулой:

$$\tfrac{1}{2} + a\,(d+1) \text{ десятитысячных.}$$

Пример. Найти $\log\pi$, принимая за π приближенное число 3,14, точное до $\tfrac{1}{2}$ сотой.

Перенеся в числе 3,14 запятую после 3-й цифры, считая слева, мы получим трехзначное число 314, точное до $\tfrac{1}{2}$ единицы; значит, предел погрешности неточного числа, т. е. то, что мы обозначили буквой a, есть $\tfrac{1}{2}$. Из таблиц находим:

$$\log 3{,}14 = 0{,}4969.$$

Табличная разность d между мантиссами чисел 314 и 315 равна 14, поэтому погрешность найденного логарифма будет менее

$$\tfrac{1}{2} + \tfrac{1}{2}\,(14+1) = 8 \text{ десятитысячных.}$$

Так как о логарифме 0,4969 мы не знаем, с недостатком ли он или с избытком, то можем только ручаться, что точный логарифм π заключается между $0{,}4969 - 0{,}0008$ и $0{,}4969 + 0{,}0008$, т. е. $0{,}4961 < \log\pi < 0{,}4977$.

282. Найти число по данному логарифму. Для нахождения числа по данному логарифму могут служить те же таблицы, по которым отыскиваются мантиссы данных чисел; но удобнее пользоваться другими таблицами, в которых помещены так называемые **антилогарифмы**, т. е. числа, соответствующие данным мантиссам. Таблицы эти, обозначенные надписью сверху „антилогарифмы“, помещены в конце этой книги вслед за таблицами логарифмов; небольшая часть их помещена на этой странице (для объяснения).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1 2 3	4 5 6	7 8 9
.25	1778	1782	1786	1791	1795	1799	1803	1807	1811	1816	0 1 1	2 2 2	3 3 4
.26	1820	1824	1828	1832	1837	1841	1845	1849	1854	1858	0 1 1	2 2 3	3 3 4
.27	1862	1866	1871	1875	1879	1834	1888	1892	1897	1901	0 1 1	2 2 3	3 3 4
.28	1905	1910	1914	1919	1923	1928	1932	1936	1941	1945	0 1 1	2 2 3	3 3 4
.29	1950	1954	1959	1963	1968	1972	1977	1982	1936	1991	0 1 1	2 2 3	3 3 4
.30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Пусть дана 4-значная мантисса 2863 (на характеристику не обращаем внимания) и требуется найти соответствующее целое число. Тогда, имея таблицы антилогарифмов, надо пользоваться ими совершенно так же, как было раньше объяснено для нахождения мантисс по данному числу, а именно: первые 2 цифры мантиссы мы находим в первом слева столбце. Затем продвигаемся от этих цифр по горизонтальной строке вправо до пересечения с вертикальным столбцом, идущим от 3-й цифры мантиссы, которую надо искать в верхней строке (или в нижней). В пересечении находим четырехзначное число 1932, соответствующее мантиссе 286. Затем от этого числа продвигаемся дальше по горизонтальной строке направо до пересечения с вертикальным столбцом, идущим от 4-й цифры мантиссы, которую надо найти наверху (или внизу) среди поставленных там цифр 1, 2, 3,... 9. В пересечении мы находим поправку 1, которую надо приложить (в уме) к найденному раньше числу 1932, чтобы получить число, соответствующее мантиссе 2863.

Таким образом, число это будет 1933. После этого, обращая внимание на характеристику, надо в числе 1933 поставить запятую на надлежащем месте.

Например:

если $\log x = 3{,}2863$, то $x = 1933$,
„ $\log x = 1{,}2863$, „ $x = 19{,}33$,
„ $\log x = 0{,}2863$, „ $x = 1{,}933$,
„ $\log x = \bar{2}{,}2863$, „ $x = 0{,}01933$ и т. п.

Вот еще примеры:

$\log x = 0{,}2287$, $x = 1{,}693$,
$\log x = \bar{1}{,}7635$, $x = 0{,}5801$,
$\log x = 3{,}5029$, $x = 3184$,
$\log x = \bar{2}{,}0436$, $x = 0{,}01106$.

Если в мантиссе указано 5 или более цифр, то берем только первые 4 цифры, отбрасывая остальные (и увеличивая 4-ю цифру на 1, если 5-я цифра есть пять или более). Напр., вместо мантиссы 35478 берем 3548, вместо 47562 берем 4756.

283. Замечание. Поправку на 4-ю и следующие цифры мантиссы можно находить и посредством интерполирования. Так, если мантисса будет 84357, то, найдя число 6966, соответствующее мантиссе 843, мы можем рассуждать далее так: если мантисса увеличивается на 1 (тысячную), т. е. сделается 844, то число, как видно из таблиц, увеличится на 16 единиц; если же мантисса увеличится не на 1 (тысячную), а на 0,57 (тысячной), то число увеличится на x единиц, причем x должно удовлетворять пропорции:

$$x:16=0,57:1, \text{ откуда } x=16\cdot 0,57=9,12.$$

Значит, искомое число будет $6966+9,12=6975,12$ или (ограничиваясь только четырьмя цифрами) 6975.

284. Предел погрешности найденного числа. Доказано, что в том случае, когда в найденном числе *занятая стоит после 3-й слева цифры*, т. е. когда характеристика логарифма есть 2, за предел погрешности можно принять сумму

$$\frac{a+0,5}{d}+0,05,$$

где a есть предел погрешности логарифма (выраженный в десятитысячных долях), по которому отыскивалось число, и d — разность между мантиссами двух трехзначных последовательных чисел, между которыми заключается найденное число (с запятой после 3-й цифры слева). Когда характеристика будет не 2, а какая-нибудь иная, то в найденном числе запятую придется перенести влево или вправо, т. е. разделить или умножить число на некоторую степень 10. При этом погрешность результата также разделится или умножится на ту же степень 10.

Пусть, например, мы отыскиваем число по логарифму 1,5950, о котором известно, что он точен до 3 десятитысячных; значит, тогда $a=3$. Число, соответствующее этому логарифму, найденное по таблице антилогарифмов, есть 39,36. Перенеся запятую после 3-й цифры слева, будем иметь число 393,6, заключающееся между 393 и 394. Из таблиц логарифмов видим, что разность между мантиссами, соответствующими этим двум числам, составляет 11 десятитысячных; значит $d=11$. Погрешность числа 393,6 будет меньше

$$\frac{3+0,5}{11}+0,05=0,32+0,05=0,37<0,5.$$

Значит, погрешность числа 39,36 будет меньше 0,05.

285. Действия над логарифмами с отрицательными характеристиками. Сложение и вычитание логарифмов не представляют никаких затруднений, как это видно из следующих примеров:

$$+\begin{array}{r}\bar{2},9734\\ 1,8302\\ \hline 0,8036\end{array}\qquad +\begin{array}{r}\bar{3},8384\\ \bar{5},8804\\ \hline \bar{7},7188\end{array}\qquad -\begin{array}{r}\bar{1},0384\\ 5,9630\\ \hline \bar{7},0754\end{array}\qquad -\begin{array}{r}0,0052\\ \bar{4},5736\\ \hline 3,4316\end{array}$$

Не представляет никаких затруднений также и умножение логарифма на положительное число, напр.:

$$\begin{array}{r} \bar{3},5837 \\ \times 9 \\ \hline \overline{22},2533 \end{array} \qquad\qquad \begin{array}{r} \bar{2},4735 \\ \times 34 \\ \hline 18940 \\ 14205 \\ \hline 16,0990 \\ -\,68 \\ \hline \overline{52},0990. \end{array}$$

В последнем примере отдельно умножена положительная мантисса на 34, затем отрицательная характеристика на 34.

Если логарифм с отрицательной характеристикой и положительной мантиссой умножается на отрицательное число, то поступают двояко: или предварительно данный логарифм обращают в отрицательный, или же умножают отдельно мантиссу и характеристику и результаты соединяют вместе, например:

$$\bar{3},5632\cdot(-4) = -2,4368\cdot(-4) = 9,7472;$$
$$\bar{3},5632\cdot(-4) = +12 - 2,2528 = 9,7472.$$

При делении могут представиться два случая: 1) отрицательная характеристика делится и 2) не делится на делитель. В первом случае отдельно делят характеристику и мантиссу:

$$\overline{10},3784:5 = \bar{2},0757.$$

Во втором случае прибавляют к характеристике столько отрицательных единиц, чтобы образовавшееся число делилось на делитель; к мантиссе прибавляют столько же положительных единиц:

$$\bar{3},7608:8 = (-8+5,7608):8 = \bar{1},7201.$$

Это преобразование надо совершать в уме, так что действие располагается так:

$$\bar{3},7608:8 = \bar{1},7201 \quad \text{или} \quad \begin{array}{l|l} \bar{3},7608 & 8 \\ \cline{2-2} & \bar{1},7201. \end{array}$$

286. Замена вычитаемых логарифмов слагаемыми. При вычислении какого-нибудь сложного выражения помощью логарифмов приходится некоторые логарифмы складывать, другие вычитать; в таком случае, при обыкновенном способе совершения действий, находят отдельно сумму слагаемых логарифмов, потом сумму вычитаемых и из первой суммы вычитают вторую. Напр., если имеем:

$$\log x = 2{,}7305 - \bar{2}{,}0740 + \bar{3}{,}5464 - 8{,}3589,$$

то обыкновенное выполнение действий расположится так:

$$+\begin{array}{r} 2{,}7305 \\ \bar{3}{,}5464 \\ \hline 0{,}2769 \end{array} \qquad +\begin{array}{r} \bar{2}{,}0740 \\ 8{,}3589 \\ \hline 6{,}4329 \end{array} \qquad -\begin{array}{r} 0{,}2769 \\ 6{,}4329 \\ \hline \bar{7}{,}8140 \end{array} = \log x.$$

Есть однако возможность заменить вычитание сложением. Так:

$$-\bar{2}{,}0740 = 2 - 0{,}0740 = 1{,}9260$$

$$-8{,}3589 = \overset{-1+1}{-8}{,}3589 = \bar{9}{,}6411.$$

Теперь можно расположить вычисление так:

$$\begin{array}{l} 2{,}7305 \\ 1{,}9260 \\ \bar{3}{,}5464 \\ \underline{\bar{9}{,}6411} \\ \bar{7}{,}8440 = \log x. \end{array}$$

287. Примеры вычислений.

Пример 1. Вычислить выражение:

$$x = \frac{\sqrt[3]{A \cdot B^4}}{C^3 \cdot \sqrt[3]{D}},$$

если $A = 0{,}8216$, $B = 0{,}04826$, $C = 0{,}005127$ и $D = 7{,}246$.

Логарифмируем данное выражение:

$$\log x = {}^1/_3 \log A + 4 \log B - 3 \log C - {}^1/_3 \log D.$$

Теперь, для избежания излишней потери времени и для уменьшения возможности ошибок, прежде всего расположим все вычисления, не исполняя пока их и не обращаясь, следовательно, к таблицам:

$\log A = \log 0{,}8216 \quad = \bar{1}, \ldots\ldots$	${}^1/_3 \log A =$
$\log B = \log 0{,}04826 \quad = \bar{2}, \ldots\ldots$	$4 \log B =$
$\log C = \log 0{,}005127 = \bar{3}, \ldots\ldots$	$-3 \log C =$
$3 \log C \ldots\ldots =$	$-{}^1/_3 \log D =$
$\log D = \log 7{,}246 \quad = 0 \ldots\ldots$	
${}^1/_3 \log D \ldots\ldots = \quad \ldots\ldots$	$\log x =$
	$x =$

После этого берем таблицы и проставляем логарифмы на оставленных свободных местах:

$\log A = \log 0{,}8216 = \bar{1}{,}9146$
$\log B = \log 0{,}04826 = \bar{2}{,}6835$
$\log C = \log 0{,}005127 = \bar{3}{,}7099$
$3 \log C \,.\,.\,.\,.\,.\,.\,. = \bar{7}{,}1297$
$\log D = \log 7{,}246 = 0{,}8601$
$^1/_3 \log D \,.\,.\,.\,.\,.\,.\,.\,. = 0{,}2867$

$^1/_3 \log A = \bar{1}{,}9715$
$4 \log B = \bar{6}{,}7340$
$-3 \log C = 6{,}8703$
$-^1/_3 \log D = \bar{1}{,}7133$

$\log x = 1{,}2891$
$x = 19{,}45.$

Предел погрешности. Сначала найдем предел погрешности числа $x_1 = 194{,}5$, равный:

$$\frac{a + 05}{d} + 0{,}05.$$

Значит, прежде всего надо найти a, т. е. предел погрешности приближенного логарифма, выраженный в десятитысячных долях. Допустим, что данные числа A, B, C и D все точные. Тогда погрешности в отдельных логарифмах будут следующие (в десятитысячных долях):

в $\log A$ . . . . $^1/_2$
в $^1/_3 \log A$ . . . . $^1/_6 + {}^1/_2 = {}^2/_3$

($^1/_2$ прибавлена потому, что при делении на 3 логарифма 1,9146 мы округлили частное, отбросив 5-ю цифру его, и, следовательно, сделали еще ошибку меньшую $^1/_2$ десятитысячной).

в $\log B$ . . . . $^1/_2$
в $4 \log B$ . . . . $^1/_2 \cdot 4 = 2$
в $\log C$ . . . . $^1/_2$
в $3 \log C$ . . . . $^3/_2$

в $-3 \log C$ . . . . $^3/_2$
в $\log D$ . . . . $^1/_2$
в $^1/_3 \log D$ . . . . $^1/_6$
в $-^1/_3 \log D$ . . . . $^1/_6$.

Теперь находим предел погрешности логарифма:

$$a = {}^2/_3 + 2 + {}^3/_2 + {}^1/_6 = 4^1/_3 \text{ (десятитысячных).}$$

Определим далее d. Так как $x_1 = 194{,}5$, то 2 целых последовательных числа, между которыми заключается x_1, будут 194 и 195. Табличная разность d между мантиссами, соответствующими этим числам, равна 22. Значит, предел погрешности числа x_1 есть:

$$\frac{a + 0{,}5}{22} + 0{,}05 = \frac{4^1/_3 + 0{,}5}{22} + 0{,}05 = \frac{4.33\ldots + 0\ 5}{22} + 0{,}05 = 0{,}27 < 0{,}3.$$

Так как $x = x_1 : 10$, то предел погрешности в числе x равен $0{,}3 : 10 = 0{,}03$. Таким образом, найденное нами число 19,45 разнится от точного числа менее, чем на 0,03. Так как мы не знаем, с недостатком или с избытком найдено наше приближение, то можем только ручаться, что

$$19{,}45 + 0.03 > x > 19.45 - 0{,}03,$$

т. е.

$$19{,}48 > x > 19{,}42,$$

и потому, если примем $x = 19{,}4$, то будем иметь приближение с недостатком с точностью до 0,1.

Пример 2. Вычислить:

$$x = (-2{,}31)^3 \sqrt[5]{72} = -(2{,}31)^3\sqrt[5]{72}.$$

Так как отрицательные числа не имеют логарифмов, то предварительно находим:

$$x' = (2{,}31)^3 \sqrt[5]{72}$$

по разложению:

$$\log x' = 3 \log 2{,}31 + {}^1/_5 \log 72.$$

После вычисления окажется:

$$x' = 28{,}99;$$

следовательно,

$$x = -28{,}99.$$

Пример 3. Вычислить:

$$x = \sqrt[3]{\sqrt[5]{8} + \sqrt[4]{3}}.$$

Сплошного логарифмирования здесь применить нельзя, так как под знаком корня стоит сумма. В подобных случаях вычисляют формулу по частям. Сначала находим $N = \sqrt[5]{8}$, потом $N_1 = \sqrt[4]{3}$; далее простым сложением определяем $N + N_1$ и, наконец, вычисляем $\sqrt[3]{N + N_1}$; окажется:

$$N = 1{,}514, \qquad N_1 = 1{,}316;$$
$$N + N_1 = 2{,}830.$$

$$\log x = \log \sqrt[3]{2{,}830} = {}^1/_3 \log 2{,}830 = 0{,}1506;$$
$$x = 1{,}415.$$

Глава четвертая.

Показательные и логарифмические уравнения.

288. **Показательными** уравнениями называются такие, в которых неизвестное входит в показатель степени, а **логарифмическими** — такие, в которых неизвестное входит под знаком log. Такие уравнения могут быть разрешаемы только в частных случаях, причем приходится основываться на свойствах логарифмов и на том начале, что если числа равны, то равны и их логарифмы, и, обратно, если логарифмы равны, то равны и соответствующие им числа.

Пример 1. Решить уравнение: $2^x = 1024$.

Логарифмируем обе части уравнения:

$$x \log 2 = \log 1024; \qquad x = \frac{\log 1024}{\log 2} = \frac{3{,}0103}{0{,}3010} = 10.$$

Пример 2. Решить уравнение: $a^{2x} - a^x = 1$.

Положив $a^x = y$, получим квадратное уравнение:

$$y^2 - y - 1 = 0,$$

откуда:

$$y_1 = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}, \quad y_2 = \frac{1 - \sqrt{5}}{2}.$$

Следовательно,

$$a^x = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \quad \text{и} \quad a^x = \frac{1 - \sqrt{5}}{2}.$$

Так как $1 - \sqrt{5} < 0$, то последнее уравнение невозможно (функция a^x всегда есть число положительное), а первое дает:

$$x = \frac{\log(1 + \sqrt{5}) - \log 2}{\log a}.$$

Пример 3. Решить уравнение:

$$\log(a + x) + \log(b + x) = \log(c + x).$$

Уравнение можно написать так:

$$\log[(a + x)(b + x)] = \log(c + x).$$

Из равенства логарифмов заключаем о равенстве чисел:

$$(a + x)(b + x) = c + x.$$

Это есть квадратное уравнение, решение которого не представляет затруднений.

Глава пятая.

Сложные проценты, срочные уплаты и срочные взносы.

289. Основная задача на сложные проценты. В какую сумму обратится капитал a рублей, отданный в рост по p сложных процентов, по прошествии t лет (t — целое число)?

Говорят, что капитал отдан по сложным процентам, если принимаются во внимание так называемые „проценты на проценты", т. е. если причитающиеся на капитал процентные деньги присоединяются в конце каждого года к капиталу для наращения их процентами в следующие годы.

Каждый рубль капитала, отданного по $p\,\%$, в течение одного года принесет прибыли $\frac{p}{100}$ рубля, и, следовательно, каждый рубль капитала через 1 год обратится в $1+\frac{p}{100}$ рубля (напр., если капитал отдан по 5%, то каждый рубль его через год обратится в $1+\frac{5}{100}$, т. е. в 1,05 рубля). Обозначив для краткости дробь $\frac{p}{100}$ одною буквою, напр. r, можем сказать, что каждый рубль капитала через год обратится в $1+r$ рублей; следовательно, a рублей обратятся через 1 год в $a(1+r)$ руб. Еще через год, т. е. через 2 года от начала роста, каждый рубль из этих $a(1+r)$ руб. обратится снова в $1+r$ руб.; значит, весь капитал обратится в $a(1+r)^2$ руб. Таким же образом найдем, что через три года капитал будет $a(1+r)^3$, через четыре года будет $a(1+r)^4$, ... вообще через t лет, если t есть целое число, он обратится в $a(1+r)^t$ руб. Таким образом, обозначив через A окончательный капитал, будем иметь следующую формулу сложных процентов:

$$A=a(1+r)^t, \text{ где } r=\frac{p}{100}.$$

Пример. Пусть $a=2\,300$ руб., $p=4$, $t=20$ лет; тогда формула дает:

$$r=\frac{4}{100}=0{,}04;\quad A=2\,300\,(1{,}04)^{20}.$$

Чтобы вычислить A, применяем логарифмы:

$$\log a=\log 2\,300+20\log 1{,}04=3{,}3617+20\cdot 0{,}0170=$$
$$=3{,}3617+0{,}3400=3{,}7017.$$

$$A=5031 \text{ рубль}.$$

Замечание. В этом примере нам пришлось $\log 1{,}04$ умножить на 20. Так как число 0,0170 есть приближенное значение $\log 1{,}04$ с точностью до $^1/_2$ десятитысячной доли, то произведение этого числа на 20 будет точно только до $^1/_2\cdot 20$, т. е. до 10 десятитысячных $=1$ тысячной. Поэтому в сумме 3,7017 мы не можем ручаться не только за цифру десятитысячных, но и за цифру тысячных. Чтобы в подобных случаях можно было получить бо́льшую точность, лучше для числа $1+r$ брать логарифмы не 4-значные, а с бо́льшим числом цифр, напр. 7-значные. Для этой цели мы приводим здесь небольшую табличку, в которой выписаны 7-значные логарифмы для наиболее употребительных значений p.

p	$1+r$	$\log(1+r)$
3	1,03	0,0128 372
$3\frac{1}{4}$	1,0325	0,0138 901
$3\frac{1}{2}$	1.035	0,0149 403
$3\frac{3}{4}$	1,0375	0,0159 881
4	1,04	0,0170 333
$4\frac{1}{4}$	1,0425	0,0180 761
$4\frac{1}{2}$	1.045	0,0191 163
$4\frac{3}{4}$	1,0475	0,0201 540
5	1,05	0,0211 893

290. Основная задача на срочные уплаты. Некто занял a рублей по $p\,\%$ с условием погасить долг, вместе с причитающимися на него процентами, в t лет, внося в конце каждого года одну и ту же сумму. Какова должна быть эта сумма?

Сумма x, вносимая ежегодно при таких условиях, называется срочною уплатою. Обозначим опять буквою r ежегодные процентные деньги с 1 руб., т. е. число $\frac{p}{100}$. Тогда к концу первого года долг a возрастает до $a(1+r)$, а за уплатою x рублей он сделается $a(1+r)-x$. К концу второго года каждый рубль этой суммы снова обратится в $1+r$ рублей, и потому долг будет $[a(1+r)-x](1+r)=a(1+r)^2-x(1+r)$, а за уплатою x рублей окажется: $a(1+r)^2-x(1+r)-x$. Таким же образом убедимся, что к концу 3-го года долг будет

$$a(1+r)^3-x(1+r)^2-x(1+r)-x,$$

и вообще к концу t-го года он окажется:

$$a(1+r)^t-x(1+r)^{t-1}-x(1+r)^{t-2}\ldots-x(1+r)-x,$$

или

$$a(1+r)^t-x[1+(1+r)+(1+r)^2+\ldots+(1+r)^{t-2}+(1+r)^{t-1}].$$

Многочлен, стоящий внутри скобок [ ], представляет сумму членов геометрической прогрессии, у которой первый член есть 1, последний $(1+r)^{t-1}$, а знаменатель $(1+r)$. По формуле для суммы членов геометрической прогрессии (§ 249) находим:

$$s = \frac{lq-a}{q-1} = \frac{(1+r)^{t-1}(1+r)-1}{(1+r)-1} = \frac{(1+r)^t-1}{r};$$

и величина долга после t-ой уплаты будет:

$$a(1+r)^t - x\frac{(1+r)^t-1}{r}.$$

По условию задачи, долг в конце t-го года должен равняться 0; поэтому:

$$a(1+r)^t - x\frac{(1+r)^t-1}{r} = 0,$$

откуда

$$x = \frac{a(1+r)^t r}{(1+r)^t-1}.$$

При вычислении этой формулы **срочных уплат** помощью логарифмов мы должны сначала найти вспомогательное число $N=(1+r)^t$ по логарифму: $\log N = t\log(1+r)$; найдя N, вычтем из него 1, тогда получим знаменатель формулы для x, после чего вторичным логарифмированием найдем:

$$\log x = \log a + \log N + \log r - \log(N-1).$$

291. Основная задача на срочные взносы. Некто вносит в банк в начале каждого года одну и ту же сумму a руб. Определить, какой капитал образуется из этих взносов по прошествии t лет, если банк платит по p сложных процентов.

Обозначив через r ежегодные процентные деньги с 1 рубля, т. е. $\frac{p}{100}$, рассуждаем так: к концу первого года капитал будет $a(1+r)$; в начале 2-го года к этой сумме прибавится a рублей; значит, в это время капитал окажется $a(1+r)+a$. К концу 2-го года он будет $a(1+r)^2+a(1+r)$; в начале 3-го года снова вносится a рублей; значит, в это время капитал будет $a(1+r)^2+a(1+r)+a$; к концу 3-го он окажется $a(1+r)^3+a(1+r)^2+a(1+r)$. Продолжая эти рассуждения далее, найдем, что к концу t-го года искомый капитал A будет:

$$\begin{aligned}A &= a(1+r)^t + a(1+r)^{t-1} + (1+r)^{t-2} + \ldots + a(1+r) = \\ &= a(1+r)\left[(1+r^{t-1}) + (1+r)^{t-2} + \ldots + 1\right] = \\ &= a(1+r)\frac{(1+r)^{t-1}(1+r)-1}{(1+r)-1} = a(1+r)\frac{(1+r)^t-1}{r}.\end{aligned}$$

Такова **формула срочных взносов**, делаемых в начале каждого года.

Ту же формулу можно получить и таким рассуждением: первый взнос в a рублей, находясь в банке t лет, обратится, согласно формуле сложных процентов, в $a\,(1+r)^t$ руб. Второй взнос, находясь в банке одним годом меньше, т. е. $t-1$ лет, обратится в $a\,(1+r)^{t-1}$ руб. Подобно этому третий взнос даст $a\,(1+r)^{t-2}$ и т. д., и, наконец, последний взнос, находясь в банке только 1 год, обратится в $a\,(1+r)$ руб. Значит, окончательный капитал A руб. будет:

$$A=a\,(1+r)^t+a\,(1+r)^{t-1}+a\,(1+r)^{t-2}+\ .\ .\ .\ +a\,(1+r),$$

что, после упрощения, дает найденную выше формулу.

При вычислении помощью логарифмов этой формулы надо поступить так же, как и при вычислении формулы срочных уплат, т. е. сначала найти число $N=(1+r)^t$ по его логарифму: $\log N=t\log(1+r)$, затем число $N-1$ и уже тогда логарифмировать формулу:

$$\log A=\log a+\log(1+r)+\log(N-1)-\log r.$$

Замечание. Если бы срочный взнос в a руб. производился не в начале, а в конце каждого года (как, напр., вносится срочная уплата x для погашения долга), то, рассуждая подобно предыдущему, найдем, что к концу t-го года искомый капитал A' руб. будет (считая в том числе и последний взнос a руб., не приносящий процентов):

$$A'=a\,(1+r)^{t-1}+a\,(1+r)^{t-2}+\ldots+a\,(1+r)+a,$$

что равно:

$$A'=a\,\frac{(1+r)^t-1}{r},$$

т. е. A' оказывается в $(1+r)$ раз менее A, что и надо было ожидать, так как каждый рубль капитала A' лежит в банке годом меньше, чем соответствующий рубль капитала A.

ОТДЕЛ ТРИНАДЦАТЫЙ.

Соединения и бином Ньютона.

Глава первая.

Соединения.

292. Определение. Различные группы, составленные из каких-либо предметов и отличающиеся одна от другой или порядком этих предметов или самими предметами, называются вообще соединениями.

Если, например, из 10 различных цифр: 0, 1, 2, 3, ... 9 будем составлять группы по нескольку цифр в каждой, напр. такие: 123, 312, 8056, 5630, 42 и т. п., то будем получать различные соединения из этих цифр. Из них некоторые, напр. 123 и 312, различаются только порядком предметов, другие же, напр. 8056 и 312, разнятся самими предметами (и даже числом предметов).

Предметы, из которых составляются соединения, называются элементами и обозначаются обыкновенно буквами a, b, c,...

Соединения могут быть трех родов: размещения, перестановки и сочетания. Рассмотрим их отдельно.

293. Размещения. Пусть число предметов, из которых мы составляем различные соединения, равно 3 (напр. три карты); обозначим эти предметы a, b и c. Из них можно составить соединения

a b c

по одному:

$$a,\ b,\ c;$$

по два:

$$ab,\ ac,\ bc;$$
$$ba,\ ca,\ cb,$$

и по три:

$$abc,\ acb,\ bac,\ bca,\ cab,\ cba.$$

Возьмем из этих соединений соединения по 2. Они отличаются одно от другого либо предметами, напр. ab и ac, либо порядком предметов, напр. ab и ba, но число предметов в них одно и то же. Такие соединения называются размещениями из 3 элементов по 2.

Вообще размещениями из m элементов по n называются такие соединения, из которых каждое содержит n элементов, взятых из данных m элементов, и которые отличаются одно от другого или предметами или порядком предметов (значит, предполагается, что $n \leqslant m$). Так, написанные выше соединения по 3 будут размещены из 3-х элементов по 3 (различаются только порядком), соединения по 2 будут размещены из 3-х элементов по 2 (различаются или предметами или порядком).

Размещения из данных m элементов могут быть по 1, по 2, по 3,... и, наконец, по m.

Иногда бывает нужно знать число всевозможных размещений, которые можно составить из m элементов по n, не составляя самих размещений. Число это принято обозначать так: A_m^n (здесь A есть начальная буква французского слова „*arrangement*“, что значит размещение). Чтобы найти это число, рассмотрим прием, посредством которого можно составлять всевозможные размещения.

Пусть нам дано m элементов: $a, b, c, \ldots k, l$. Сначала составим из них все размещения по одному. Их, очевидно, будет m. Значит: $A_m^1 = m$. Теперь составим все размещение по два. Для этого к каждому из ранее составленных размещений по одному приставим последовательно все оставшиеся $m-1$ элементов по одному. Так, к элементу a приставим последовательно оставшиеся элементы: $b, c, \ldots k, l$; к элементу b приставим последовательно оставшиеся элементы: $a, c, \ldots k, l$, и т. д. Тогда получим следующие размещения по два:

$$m\ \text{строк}\left\{\begin{array}{ll}
ab,\ ac,\ ab,\ \ldots\ldots\ ak,\ al & (m-1\ \text{размещений}) \\
ba,\ bc,\ bd,\ \ldots\ldots\ bk,\ bl & (m-1\ \text{размещений}) \\
ca,\ cb,\ cd,\ \ldots\ldots\ ck,\ cl & (m-1\ \text{размещений}) \\
\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & \ldots\ldots\ldots \\
la,\ lb,\ lc,\ \ldots\ldots\ lk & (m-1\ \text{размещений}).
\end{array}\right.$$

Так как всех элементов m, то из каждого размещения по 1 элементу мы получим $m-1$ размещений по 2, а всего их будет $(m-1)\,m$. Очевидно, что других размещений по 2 быть не может. Значит:

$$A^2_m = m\,(m-1).$$

Чтобы составить теперь размещения по 3, берем каждое из составленных сейчас размещений по 2 и приставляем к нему последовательно по одному все $m-2$ оставшихся элементов. Тогда получим следующие размещения по 3:

$$m\,(m-1)\ \text{строк}\left\{\begin{array}{ll} abc,\ abd\ \ldots\ldots\ abk,\ abl & (m-2\ \text{размещений})\\ acb,\ acd\ \ldots\ldots\ ack,\ acl & (m-2\ \text{размещений})\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & \ldots\ldots\ldots\ldots \\ lka,\ lkb\ \ldots\ldots\ldots\ldots & (m-2\ \text{размещений}).\end{array}\right.$$

Так как число всех размещений по 2 равно $m\,(m-1)$ и из каждого получается $(m-2)$ размещения по 3, то всех таких размещений окажется:

$$(m-2)\,[m\,(m-1)] = m\,(m-1)\,(m-2).$$

Таким образом:

$$A^3_m = m\,(m-1)\,(m-2).$$

Подобно этому получим:

$$A^4_m = m\,(m-1)\,(m-2)\,(m-3);$$

$$A^5_m = m\,(m-1)\,(m-2)\,(m-3)\,(m-4),$$

и вообще:

$$A^n_m = m\,(m-1)\,(m-2)\ \ldots\ [m-(n-1)].$$

Такова **формула размещений**; ее можно высказать так: *число всевозможных размещений из m элементов по n равно произведению n последовательных целых чисел, из которых большее есть m.*

Таким образом:

$$A^2_4 = 4\cdot 3 = 12;\quad A^3_4 = 4\cdot 3\cdot 2 = 24,$$

$$A^4_8 = 8\cdot 7\cdot 6\cdot 5 = 1680,\ \text{и т. п.}$$

294. Задачи. 1) В классе 10 учебных предметов и 5 разных уроков в день. Сколькими способами могут быть распределены уроки в день?

Всевозможные распределения уроков в день представляют собою, очевидно, всевозможные размещения из 10 элементов по 5; поэтому всех способов распределения должно быть:

$$A_{10}^{5}=10\cdot 9\cdot 8\cdot 7\cdot 6=30\,240.$$

2). Сколько можно образовать целых чисел, из которых каждое выражалась бы тремя различными значащими цифрами?

Искомое число есть число размещений из 9 значащих цифр по 3; следовательно, оно равно $9\cdot 8\cdot 7=504$.

3) Сколько можно образовать целых чисел, из которых каждое выражалось бы тремя различными цифрами?

Из 10 цифр: 0, 1, 2, 3, ... 9 можно составить размещений по три $10\cdot 9\cdot 8=720$; но из этого числа надо исключить число тех размещений по три, которые начинаются с цифры 0. Таких размещений будет столько, сколько можно составить размещений по 2 из 9 значащих цифр, т. е. $9\cdot 8=72$; следовательно, искомое число $720-72=648$.

295. Перестановки. Если размещения из m элементов взяты по m (и значит, различаются только порядком элементов), то такие размещения называются перестановками. Напр., перестановки из двух элементов a и b будут размещения из 2-х по 2, т. е. ab и ba, перестановки из 3-х элементов будут размещены из 3-х по 3, т. е. abc, acb, bac, bca, cab, cba, и т. п.

Число всевозможных перестановок из m элементов обозначается P_m (здесь P есть начальная буква французского слова „*permutation*“, что значит: перестановка).

Так как перестановки из m элементов — это размещения из m по m, то формула перестановок будет такая:

$$P_m=A_m^m=m(m-1)(m-2)\ldots 3\cdot 2\cdot 1=1\cdot 2\cdot 3\ldots(m-1)m,$$

т. е. *число всевозможных перестановок из m элементов равно произведению натуральных чисел от 1 до m.*

296. Задачи. 1) Сколько девятизначных чисел можно написать девятью разными значащими цифрами?

Искомое число есть $P_9=1\cdot 2\cdot 3\ldots 9=362\,880$.

2) Сколькими способами можно разместить 12 лиц за столом, на котором поставлено 12 приборов?

Число способов $=1\cdot 2\cdot 3\ldots 12=479\,001\,600$.

Замечание. Произведение натуральных чисел от 1 до m включительно (обозначается сокращенно так: $m!$) растет чрезвычайно быстро с возрастанием m; так, при $m = 12$ оно дает 479 001 600, при $m = 100$ оно выражается числом, требующим 158 цифр для своего изображения.

297. Сочетания. Если из всех размещений, которые можно составить из m элементов по n, мы отберем только те, которые одно от другого разнятся, по крайней мере, одним элементом, то получим размещения, которые называются сочетаниями.

Напр., из 4 элементов a, b, c и d, сочетания по 3 будут:

$$abc,\ abd,\ acd,\ bcd.$$

Если в каждом из этих сочетаний сделаем всевозможные перестановки, то получим всевозможные размещания из 4-х элементов по 3.

abc	abd	acd	bcd
acb	adb	adc	bdc
bac	bad	cad	cbd
bca	bda	cda	cdb
cab	dab	dac	dbc
cba	dba	dca	dcb

Число таких размещений равно, очевидно, $6 \cdot 4 = 24$.

Таким образом, число всех размещений из m элементов по n равно числу всех сочетаний из m элементов по n, умноженному на число всех перестановок, какие можно сделать из n элементов, т. е.

$$A^n_m = C^n_m P_n,$$

где C^n_m означает число всех сочетаний из m по n (C есть начальная буква французского слова „*combinaison*“, что значит: сочетание).

Отсюда выводим следующую формулу сочетаний:

$$C^n_m = \frac{A^n_m}{P_n} = \frac{m(m-1)(m-2)\ldots[m-(n-1)]}{1 \cdot 2 \cdot 3 \ldots n}.$$

Например:

$$C^2_4 = \frac{4 \cdot 3}{1 \cdot 2} = 6, \quad C^3_4 = \frac{4 \cdot 3 \cdot 2}{1 \cdot 2 \cdot 3} = 4, \text{ и т. п.}$$

298. Задачи. 1) Из 10 кандидатов на одну и ту же должность должны быть выбраны трое. Сколько может быть разных случаев выборов?

Искомое число, очевидно, составляет число всевозможных сочетаний из 10 элементов по 3, т. е.

$$C_{10}^{3}=\frac{10\cdot9\cdot8}{1\cdot2\cdot3}=120.$$

2) Сколькими способами можно выбрать 13 карт из колоды в 52 карты?

Искомое число представляет собою число сочетаний из 52 по 13, т. е.

$$C_{52}^{13}=\frac{52\cdot51\cdot50\cdot\ldots\cdot40}{1\cdot2\cdot\ldots\cdot13}=635\,013\,559\,600.$$

299. Другой вид формулы сочетаний. Формулу сочетаний можно привести к другому виду, если умножим числитель и знаменатель ее на произведение $1\cdot2\cdot3\ldots(m-n)$; тогда в числителе получим произведение:

$$m(m-1)\ldots[m-(n-1)]\cdot1\cdot2\cdot3\ldots(m-n),$$

которое, переставив сомножители, можно написать так:

$$1\cdot2\cdot3\ldots(m-n)\,[m-(n-1)]\ldots m.$$

Следовательно,

$$C_m^n=\frac{1\cdot2\cdot3\ldots(m-1)\,m}{1\cdot2\cdot3\ldots n\cdot1\cdot2\cdot3\ldots(m-n)}=\frac{P_m}{P_n\cdot P_{m-n}}.$$

300. Свойство сочетаний. Заменив в этой формуле n на $m-n$, получим:

$$C_m^{m-n}=\frac{1\cdot2\cdot3\ldots(m-1)\,m}{1\cdot2\cdot3\ldots(m-n)\cdot1\cdot2\cdot3\ldots n}=\frac{P_m}{P_{m-n}\cdot P_n}.$$

Сравнивая эту формулу с предыдущей, находим:

$$C_m^n=C_m^{m-n}.$$

К этому выводу приводит и такое простое рассуждение: если из m элементов отберем какие-нибудь n, чтобы составить из них одно сочетание, то совокупность оставшихся элементов составит одно сочетание из $m-n$ элементов. Таким образом, каждому сочетанию из n элементов соответствует одно сочетание из $m-n$ элементов, и наоборот; значит:

$$C_m^n=C_m^{m-n}.$$

Это соотношение позволяет упростить нахождение числа сочетаний из m элементов по n, когда n превосходит $^1/_2\ m$. Например:

$$C_{100}^{97}=C_{100}^{3}\ \frac{100\cdot99\cdot98}{1\cdot2\cdot3}=161\,700.$$

Глава вторая.

Бином Ньютона.

301. Произведение биномов, отличающихся только вторыми членами. Обыкновенным умножением находим:

$$(x+a)(x+b)=x^2+ax+bx+ab=x^2+(a+b)x+ab;$$
$$(x+a)(x+b)(x+c)=[x^2+(a+b)x+ab](x+c)=$$
$$=x^3+(a+b)x^2+abx+cx^2+(ac+bc)x+abc=$$
$$=x^3+(a+b+c)x^2+(ab+ac+bc)x+abc.$$

Подобно этому найдем:

$$(x+a)(x+b)(x+c)(x+d)=x^4+(a+b+c+d)x^3+$$
$$+(ab+ac+ad+bc+bd+cd)x^2+(abc+abd+acd+bcd)x+$$
$$+abcd.$$

Рассматривая эти произведения, замечаем, что все они составлены по одному и тому же закону, а именно:

Произведение составляет многочлен, расположенный по убывающим степеням буквы x.

Показатель первого члена равен числу перемножаемых биномов; показатели при x в следующих членах постепенно убывают на 1; последний член не содержит x (содержит его в нулевой степени).

Коэффициент первого члена есть 1; коэффициент второго члена есть сумма всех вторых членов перемножаемых биномов; коэффициент третьего члена есть сумма всех произведений вторых членов, взятых по два; коэффициент четвертого члена есть сумма всех произведений вторых членов, взятых по три. Последний член есть произведение всех вторых членов.

Докажем, что этот закон применим к произведению какого угодно числа биномов. Для этого предварительно убедимся, что если он верен для произведения m биномов:

$$(x+a)\ (x+b)\ (x+c)\ .\ .\ .\ .\ .\ (x+k),$$

то будет верен и для произведения $(m+1)$ биномов:

$$(x+a)(x+b)(x+c)\ .\ .\ .\ (x+k)(x+l).$$

Итак, допустим, что верно следующее равенство:

$$(x+a)(x+b)(x+c)\ .\ .\ .\ (x+k)=$$
$$=x^m+S_1x^{m-1}+S_2x^{m-2}+\ .\ .\ .\ +S_m,$$

где

$$S_1=a+b+c+\ .\ .\ .+i+k$$
$$S_2=ab+ac+\ .\ .\ .+ik$$
$$S_3=abc+abd+\ .\ .\ .$$
$$.\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .$$
$$S_m=abc\ .\ .\ .\ ik$$

Умножим обе части этого равенства на новый бином $x+l$:

$$(x+a)(x+b)\dots(x+k)(x+l)=$$
$$=(x^m+S_1x^{m-1}+S_2x^{m-2}+\dots+S_m)(x+l)=x^{m+1}+$$
$$+S_1x^m+S_2x^{m-1}+\dots+S_mx+lx^m+lS_1x^{m-1}+lS_2x^{m-2}+\dots+lS_m=$$
$$=x^{m+1}+(S_1x+l)^m+(S_2+lS_1)x^{m-1}+\dots+(S_m+lS_{m-1})x+lS_m.$$

Рассматривая это новое произведение, убеждаемся, что оно подчиняется такому же закону, какой мы предположили верным для m биномов. Действительно, во-первых, этому закону следуют показатели буквы x; во-вторых, ему же следуют и коэффициенты, так как коэффициент 2-го числа S_1+l есть сумма всех вторых членов перемножаемых биномов, включая сюда и l, коэффициент 3-го члена S_2+lS_1 есть сумма парных произведений всех вторых членов, включая сюда и l, и т. д.; наконец lS_m есть произведение всех вторых членов: a, b, $c, \dots k$, l.

Мы видели, что закон этот верен для 4 биномов; следовательно по доказанному теперь, он должен быть верен для $4+1$, т. е. для 5 биномов; если же он верен для 5 биномов, то он верен и для $5+1$, т. е. для 6 биномов, и т. д.

Изложенное рассуждение представляет так называемое „доказательство от m к $m+1$“. Оно называется также „математической индукцией“ (или „совершенной индукцией“). Заметим, что в предыдущих главах этой книги неоднократно представлялся случай применить доказательство от m к $m+1$ (напр. при выводе формулы любого члена прогрессии, §§ 241, 248 и др.). Мы этого не делали только ради простоты изложения.

302. Формула бинома Ньютона. Предположим, что в доказанном нами равенстве:

$$(x+a)(x+b)\ .\ .\ .\ (x+k)=x^m+S_1x^{m-1}+S_2x^{m-2}+\dots+S_m$$

все вторые члены биномов одинаковы, т. е. что $a=b=c=\dots=k$. Тогда левая часть будет степень бинома $(x+a)^m$. Посмотрим, во что обратятся коэффициенты S_1, S_2, . . . S_m.

Коэффициент S_1, равный $a+b+c+\ldots+k$, обратится в ma, Коэффициент S_2, равный $ab+ac+ad+\ldots$, обратится в число a^2, повторенное столько раз, сколько можно составить сочетаний из m элементов по 2, т. е. он обратится в $\frac{m(m-1)}{1\cdot 2}a^2$. Коэффициент S_3, равный $abc+abd+\ldots$, обратится в число a^3, повторенное столько раз, сколько можно составить сочетаний из m элементов по 3, т. е. в $\frac{m(m-1)(m-2)}{1\cdot 2\cdot 3}a^3$, и т. д. Наконец, коэффициент S_m, равный $abc\ .\ .\ .\ k$, обратится в a^m. Таким образом мы получим:

$$(x+a)^m=x^m+max^{m-1}+\frac{m(m-1)}{1\cdot 2}a^2x^{m-2}+\frac{m(m-1)(m-2)}{1\cdot 2\cdot 3}a^3x^{m-3}+\ldots$$

$$\ldots+\frac{m(m-1)\ldots[m-(n-1)]}{1\cdot 2\cdot 3\ .\ .\ .\ n}a^nx^{m-n}+\ldots+a^m$$

Это равенство известно как **формула бинома Ньютона**[1], причем многочлен, стоящий в правой части формулы, называется **разложением** бинома. Рассмотрим особенности этого многочлена.

303. Свойства бинома Ньютона. Этих свойств мы укажем следующие 10:

1) Показатели буквы x постепенно уменьшаются на 1 от первого члена к последнему, причем в первом члене показатель x равен показателю степени бинома, а в последнем он есть 0; наоборот, показатели буквы a постепенно увеличиваются на 1 от первого члена к последнему, причем в первом члене показатель при a есть 0, а в последнем он равен показателю степени бинома. Вследствие этого сумма показателей при x и a в каждом члене одна и та же, а именно: она равна показателю степени бинома.

2) Число всех членов разложения есть $m+1$, так как разложение содержит все степени a от 0 до m включительно.

3) Коэффициенты равны: у первого члена 1, у 2-го члена — показателю степени бинома, у 3-го члена — числу сочетаний из m элементов по 2, у 4-го члена — числу сочетаний из m элементов по 3; вообще коэффициент $(n+1)$-го члена есть число

---

[1] *Исаак Ньютон*, знаменитый английский математик, жил от 1642 г. по 1724 г. Формула бинома, не только для m целого положительного, но и для m отрицательного и дробного, была им указана около 1665 г. Однако строгого доказательства ее он не дал. Для целых положительных показателей формула была впервые доказана *Яковом Бернулли* (1645 — 1705) с помощью теории соединений.

сочетаний из m элементов по n. Наконец, коэффициент последнего члена равен числу сочетаний из m элементов по m, т. е. 1.

Заметим, что все эти коэффициенты называются биномиальными.

4) Обозначая каждый член разложения буквою T с цифрою внизу, указывающею номер места этого члена в разложении, т. е. первый член T_1, второй член T_2 и т. д., мы можем написать:

$$T_{n+1}=C_m^n x^{m-n}=\frac{m(m-1)\dots[m-(n-1)]}{1\cdot2\cdot3\dots n}a^n x^{m-n}.$$

Эта формула выражает **общий член разложения**, так как из нее можем получить все члены (кроме первого), подставляя на место n числа: 1, 2, 3,. . .m.

5) Коэффициент 1-го члена от начала разложения равен 1, коэффициент 1-го члена от конца тоже равен 1. Коэффициент второго члена от начала есть m, т. е. C_m^1; коэффициент 2-го члена от конца есть C_m^{m-1}; но так как $C_m^1=C_m^{m-1}$ (§ 377), то эти коэффициенты одинаковы. Коэффициент 3-го члена от начала есть C_m^2, а 3-го члена от конца есть C_m^{n-2}; но $C_m^2=C_m^{m-2}$, поэтому и эти коэффициенты одинаковы, и т. д. Значит, *коэффициенты членов, одинаково удаленных от концов разложения, равны между собою.*

6) Рассматривая биномиальные коэффициенты:

$$1,\ m,\ \frac{m(m-1)}{1\cdot2},\ \frac{m(m-1)(m-2)}{1\cdot2\cdot3},\ \frac{m(m-1)(m-2)(m-3)}{1\cdot2\cdot3\cdot4},\dots,$$

мы замечаем, что при переходе от одного коэффициента к следующему числители умножаются на числа все меньшие и меньшие (на $m-1$, на $m-2$, на $m-3$ и т. д.), а знаменатели умножаются на числа все бо́льшие и бо́льшие (на 2, на 3, на 4 и т. д.). Вследствие этого коэффициенты сначала возрастают (пока множители в числителе остаются бо́льшими соответственных множителей в знаменателе), а затем убывают. Так как коэффициенты членов, равноотстоящих от концов разложения, одинаковы, то наибольший коэффициент должен находиться посредине разложения. При этом, если число всех членов разложения нечетное (что бывает при четном показателе бинома), то по средине будет один член с наибольшим коэффициентом; если же число всех членов четное (что бывает при нечетном показателе бинома), то посредине должны быть 2 члена с одинаковыми наибольшими коэффициентами. Например.

$$(x+a)^4 = x^4 + 4ax^3 + 6a^2x^2 + 4a^3x + a^4;$$
$$(x+a)^5 = x^5 + 5ax^4 + 10a^2x^3 + 10a^3x^2 + 5a^4x + a^5.$$

7) Из сравнения двух рядом стоящих членов:

$$T_{n+1} = \frac{m(m-1)\dots[m-(n-1)]}{1\cdot2\cdot3\dots n}a^n x^{m-n},$$
$$T_{n+2} = \frac{m(m-1)\dots[m-(n-1)](m-n)}{1\cdot2\cdot3\dots n(n+1)}a^{n+1}x^{m-n-1}$$

видно, что *для получения коэффициента следующего члена достаточно умножить коэффициент предыдущего члена на показатель буквы x в этом члене и разделить на число членов, предшествующих определяемому.*

Пользуясь этим свойством, можно сразу писать, напр.:

$$(x+a)^7 = x^7 + 7ax^6\dots$$

Теперь берем 7, умножаем его на 6 и делим на два, получаем 21:

$$(x+a)^7 = x^7 + 7ax^6 + 21a^2x^5\dots$$

Теперь берем 21, умножаем на 5 и делим на 3, получаем 35:
$$(x+a)^7 = x^7 + 7ax^6 + 21a^2x^5 + 35a^3x^4\dots$$

Теперь уже выписаны члены до середины ряда, остальные получим, основываясь на свойстве 5-м:

$$(x+a)^7 = x^7 + 7ax^6 + 21a^2x^5 + 35a^3x^4 + 35a^4x^3 + 21a^5x^2 + 7a^6x + a^7.$$

8) *Сумма всех биномиальных коэффициентов равна 2^m.* Действительно, положив в формуле бинома $x = a = 1$, получим:

$$2^m = 1 + m + \frac{m(m-1)}{1\cdot2} + \frac{m(m-1)(m-2)}{1\cdot2\cdot3} + \dots + 1.$$

Напр., сумма коэффициентов в разложении $(x+a)^7$ равна:

$$1 + 7 + 21 + 35 + 35 + 21 + 7 + 1 = 128 = 2^7.$$

9) Заменив в формуле бинома a на $-a$, получим:

$$(x-a)^m = x^m + m(-a)x^{m-1} + \frac{m(m-1)}{1\cdot2}(-a)^2x^{m-2} + \dots + (-a)^m,$$

т. е.

$$(x-a)^m = x^m - max^{m-1} + \frac{m(m-1)}{1\cdot2}a^2x^{m-2}\dots + (-1)^m a^m,$$

и следовательно, знаки + и — чередуются:

10) Если в последнем равенстве положим $x = a = 1$, то найдем:

$$0 = 1 - m + \frac{m(m-1)}{1\cdot 2} - \frac{m(m-1)(m-2)}{1\cdot 2\cdot 3} + \ldots + (-1)^m,$$

т. е. *сумма биномиальных коэффициентов, стоящих на нечетных местах, равна сумме биномиальных коэффициентов, стоящих на четных местах.*

304. Применение формулы бинома к многочлену. Формула бинома Ньютона позволяет возвышать в степень трехчлен и вообще многочлен. Так:

$$(a + b + c)^4 = [(a + b) + c]^4 = (a + b)^4 + 4c(a + b)^3 + 6c^2(a + b)^2 + 4c^3(a + b) + c^4.$$

Разложив $(a+b)^4$, $(a+b)^3$, $(a+b)^2$, окончательно получим

$$(a + b + c)^4 = a^4 + 4a^3b + 6a^2b^2 + 4ab^3 + b^4 + 4a^3c + 12a^2bc + 12ab^2c + 4b^3c + 6a^2c^2 + 12abc^2 + 6b^2c^2 + 4ac^3 + 4bc^3 + c^4.$$

305. Сумма одинаковых степеней членов арифметической прогрессии. Укажем одно из интересных применений формулы бинома. Пусть имеем арифметическую прогрессию, содержащую $n + 1$ членов:

$$\div a,\ b,\ c, \ldots\ k,\ l.$$

Если разность ее d, то $b = a + d$, $c = b + d, \ldots$ $l = k + d$. Возвысив эти равенства по формуле бинома Ньютона в $m + 1$ степень, получим n следующих равенств:

$$b^{m+1} = (a + d)^{m+1} = a^{m+1} + (m+1)a^m d + \frac{(m+1)m}{1\cdot 2} a^{m-1}d^2 + \ldots + d^{m+1}$$

$$c^{m+1} = (b + d)^{m+1} = b^{m+1} + (m + 1)b^m d + \frac{(m+1)m}{1\cdot 2} b^{m-1}d^2 + \ldots + d^{m+1}$$

. . . .

$$l^{m+1} = (k + d)^{m+1} = k^{m+1} + (m + 1)k^m d + \frac{(m+1)m}{1\cdot 2} k^{m-1}d^2 + \ldots + d^{m+1}$$

Сложив эти равенства и положив для краткости:

$$S_m = a^m + b^m + c^m + \ldots + k^m,$$
$$S_{m-1} = a^{m-1} + b^{m-1} + c^{m-1} + \ldots + k^{m-1},$$

. . . .

$$S_1 = a + b + c + \ldots + k,$$

получим (члены: $b^{m+1} \ldots k^{m+1}$ сократятся):

$$l^{m+1} = a^{m+1} + (m + 1)dS_m + \frac{(m+1)m}{1\cdot 2} d^2S_{m-1} + \ldots + nd^{m+1}.$$

Из этого уравнения определим S_m, если известны S_{m-1}, $S_{m-2}, \ldots S_1$. Полагая последовательно $m=1, 2, 3, \ldots$, найдем S_1, потом S_2, затем S_3 и т. д.

306. Сумма одинаковых степеней чисел натурального ряда. Применив выведенное в предыдущем параграфе уравнение к прогрессии:

$$\div 1, 2, 3, 4, \ldots n, n+1,$$

получим:

$$(n+1)^{m+1} = 1 + (m+1) S_m + \frac{(m+1)m}{1 \cdot 2} S_{m-1} + \ldots + n.$$

Полагая $m=1$, найдем:

$$(n+1)^2 = 1 + 2S_1 + n; \text{ откуда: } S_1 = \frac{n(n+1)}{2}.$$

При $m=2$ получим:

$$(n+1)^3 = 1 + 3S_2 + 3S_1 + n = 1 + 3S_2 + \frac{3n(n+1)}{2} + n,$$

откуда:

$$S_2 = \frac{(n+1)^3 - (n+1)}{3} - \frac{3n(n+1)}{6} = \frac{2n^3 + 3n^2 + n}{6} =$$

$$= \frac{n(2n^2 + n + n + 1)}{6} = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} =$$

$$= \frac{n(n+1)}{2} \cdot \frac{2n+1}{3} = S_1 \cdot \frac{2n+1}{3} \text{ (ср. § 244).}$$

При $m=3$ находим:

$$(n+1)^4 = 1 + 4S_3 + 6S_2 + 4S_1 + n = 1 + 4S_3 + n(n+1)(2n+1) + $$
$$+ 2n(n+1) + n,$$

откуда:

$$S_3 = \frac{n^4 + 2n^3 + n^2}{4} = \frac{n^2(n+1)^2}{4} = \left(\frac{n(n+1)}{2}\right)^2 = S_1^2.$$

Подобным же образом можно было бы найти S_4, S_5 и т. д.

КВАДРАТНЫЕ КОРНИ.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	1000	1005	1010	1015	1020	1025	1030	1034	1039	1044	0	1	1	2	2	3	3	4	4
	3162	3178	3194	3209	3225	3240	3256	3271	3286	3302	2	3	5	6	8	9	11	12	13
11	1049	1054	1058	1063	1068	1072	1077	1082	1086	1091	0	1	1	2	2	3	3	4	4
	3317	3332	3347	3362	3376	3391	3406	3421	3435	3450	1	3	4	6	7	9	10	12	13
12	1095	1100	1105	1109	1114	1118	1122	1127	1131	1136	0	1	1	2	2	3	3	4	4
	3464	3479	3493	3507	3521	3536	3550	3564	3578	359-	1	3	4	6	7	8	10	11	13
13	1140	1145	1149	1153	1158	1162	1166	1170	1175	1179	0	1	1	2	2	3	3	3	4
	3606	3619	3633	3647	3661	3674	3688	3701	3715	3728	1	3	4	5	7	8	10	11	12
14	1183	1187	1192	1196	1200	1204	1208	1212	1217	1221	0	1	1	2	2	3	3	3	4
	3742	3755	3768	3782	3795	3808	3821	3834	3847	3860	1	3	4	5	7	8	9	11	12
15	1225	1229	1233	1237	1241	1245	1249	1253	1257	1261	0	1	1	2	2	3	3	3	4
	3873	3886	3899	3912	3924	3937	3950	3962	3975	3987	1	3	4	5	6	8	9	10	11
16	1265	1269	1273	1277	1281	1285	1288	1292	1296	1300	0	1	1	2	2	3	3	3	4
	4000	4012	4025	4037	4050	4062	4074	4087	4099	4111	1	2	4	5	6	7	9	10	11
17	1304	1308	1311	1315	1319	1323	1327	1330	1334	1338	0	1	1	2	2	2	3	3	3
	4123	4135	4147	4159	4171	4183	4195	4207	4219	4231	1	2	4	5	6	7	8	10	11
18	1342	1345	1349	1353	1356	1360	1364	1367	1371	1375	0	1	1	1	2	2	3	3	3
	4243	4254	4266	4278	4290	4301	4313	4324	4336	4347	1	2	3	5	6	7	8	9	10
19	1378	1382	1386	1389	1393	1396	1400	1404	1407	1411	0	1	1	1	2	2	3	3	3
	4359	4370	4382	4393	4405	4416	4427	4438	4450	4461	1	2	3	5	6	7	8	9	10
20	1414	1418	1421	1425	1428	1432	1435	1439	1442	1446	0	1	1	1	2	2	2	3	3
	4472	4483	4494	4506	4517	4528	4539	4550	4561	4572	1	2	3	4	5	7	8	9	10
21	1449	1453	1456	1459	1463	1466	1470	1473	1476	1480	0	1	1	1	2	2	2	3	3
	4583	4593	4604	4615	4626	4637	4648	4658	4669	4680	1	2	3	4	5	6	8	9	10
22	1483	1487	1490	1493	1497	1500	1503	1507	1510	1513	0	1	1	1	2	2	2	3	3
	4690	4701	4712	4722	4733	4743	4754	4764	4775	4785	1	2	3	4	5	6	7	8	9
23	1517	1520	1523	1526	1530	1533	1536	1539	1543	1546	0	1	1	1	2	2	2	3	3
	4796	4806	4817	4827	4837	4848	4858	4868	4879	4889	1	2	3	4	5	6	7	8	9
24	1549	1552	1556	1559	1562	1565	1568	1572	1575	1578	0	1	1	1	2	2	2	3	3
	4899	4909	4919	4930	4940	4950	4960	4970	4980	4990	1	2	3	4	5	6	7	8	9
25	1581	1584	1587	1591	1594	1597	1600	1603	1606	1609	0	1	1	1	2	2	2	3	3
	5000	5010	5020	5030	5040	5050	5060	5070	5079	5089	1	2	3	4	5	6	7	8	9
26	1612	1616	1619	1622	1625	1628	1631	1634	1637	1640	0	1	1	1	2	2	2	2	3
	5099	5109	5119	5128	5138	5148	5158	5167	5177	5187	1	2	3	4	5	6	7	8	9
27	1643	1646	1649	1652	1655	1658	1661	1664	1667	1670	0	1	1	1	2	2	2	2	3
	5196	5206	5215	5225	5235	5244	5254	5263	5273	5282	1	2	3	4	5	6	7	8	9
28	1673	1676	1679	1682	1685	1688	1691	1694	1697	1700	0	1	1	1	1	2	2	2	3
	5292	5301	5310	5320	5329	5339	5348	5357	5367	5376	1	2	3	4	5	6	7	7	8
29	1703	1706	170	1712	1715	1718	1720	1723	1726	1729	0	1	1	1	1	2	2	2	3
	5385	5394	540	5413	5422	5431	5441	5450	5459	5468	1	2	3	4	5	5	6	7	8
30	1732	1735	1738	1741	1744	1746	1749	1752	1755	1758	0	1	1	1	1	2	2	2	3
	5477	5486	5485	5505	5514	5523	5532	5541	5550	5559	1	2	3	4	4	5	6	7	8
31	1761	1764	1766	1769	1772	1775	1778	1780	1783	1786	0	1	1	1	1	2	2	2	3
	5568	5577	5586	558-	5604	5612	5621	5630	5639	5648	1	2	3	3	4	5	6	7	8
32	1789	792	1794	1797	1800	1803	1806	1808	1811	1814	0	1	1	1	1	2	2	2	2
	5657	5666	5675	5683	5692	5701	5710	5718	5727	5736	1	2	3	3	4	5	6	7	8
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Первая значащая цифра и положение запятой в десятичной дроби определяются предварительно (см. стр. 181).

КВАДРАТНЫЕ КОРНИ.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
33	1817 5745	1819 5753	1822 5762	1825 5771	1828 5779	1830 5788	1833 5797	1836 5805	1838 5814	1841 5822	0 1	1 2	1 3	1 3	1 4	2 5	2 6	2 7	2 8
34	1844 5831	1847 5840	1849 5848	1852 5857	1855 5865	1857 5874	1860 5882	1863 5891	1865 5899	1868 5908	0 1	1 2	1 3	1 3	1 4	2 5	2 6	2 7	2 8
35	1871 5916	1873 5925	1876 5933	1879 5941	1881 5950	1884 5958	1887 5967	1889 5975	1892 5983	1895 5992	0 1	1 2	1 2	1 3	1 4	2 5	2 6	2 7	2 8
36	1897 6000	1900 6008	1903 6017	1905 6025	1908 6033	1910 6042	1913 6050	1916 6058	1918 6066	1921 6075	0 1	1 2	1 2	1 3	1 4	2 5	2 6	2 7	2 7
37	1924 6083	1926 6091	1929 6099	1931 6107	1934 6116	1936 6124	1939 6132	1942 6140	1944 6148	1947 6156	0 1	1 2	1 2	1 3	1 4	2 5	2 6	2 7	2 7
38	1949 6164	1952 6173	1954 6181	1957 6189	1960 6197	1962 6205	1965 9213	1967 6221	1970 6229	1972 6237	0 1	1 2	1 2	1 3	1 4	2 5	2 6	2 6	2 7
39	1975 6245	1977 6253	1980 6261	1982 6269	1985 6277	1987 6285	1990 6293	1992 6301	1995 6309	1997 6317	0 1	1 2	1 2	1 3	1 4	2 5	2 6	2 6	2 7
40	2000 6325	2002 6332	2005 6340	2007 6348	2010 6356	2012 6364	2015 6372	2017 6380	2020 6387	2022 6395	0 1	0 2	1 2	1 3	1 4	1 5	2 6	2 6	2 7
41	2025 6403	2027 6411	2030 6419	2032 6427	2035 6434	2037 6442	2040 6450	2042 6458	2045 6465	2047 6473	0 1	0 2	1 2	1 3	1 4	1 5	2 5	2 6	2 7
42	2049 6481	2052 6488	2054 6496	2057 6504	2059 6512	2062 6519	2064 6527	2066 6535	2069 6542	2071 6550	0 1	0 2	1 2	1 3	1 4	1 5	2 5	2 6	2 7
43	2074 6557	2076 6565	2078 9573	2081 6580	2083 6588	2086 6595	2088 6603	2090 6611	2093 6618	2095 6626	0 1	0 2	1 2	1 3	1 4	1 5	2 5	2 6	2 7
44	2098 6633	2100 6641	2102 6648	2105 6656	2107 6663	2110 6671	2112 6678	2114 6686	2117 6693	2119 6701	0 1	0 2	1 2	1 3	1 4	1 4	2 5	2 6	2 7
45	2121 6708	2124 6716	2126 6723	2128 6731	2131 6738	2133 6745	2135 6753	2138 6760	2140 6768	2142 6775	0 1	0 1	1 2	1 3	1 4	1 4	2 5	2 6	2 7
46	2145 6782	2147 6790	2149 6797	2152 6805	2154 6812	2156 6819	2159 6826	2161 6834	2163 6841	2166 6848	0 1	0 1	1 2	1 3	1 4	1 4	2 5	2 6	2 7
47	2168 6856	2170 6863	2173 6870	2175 6877	2177 6885	2179 6892	2182 6899	2184 6907	2186 6914	2189 6921	0 1	0 1	1 2	1 3	1 4	1 4	2 5	2 6	2 7
48	2191 6928	2193 6935	2195 6943	2198 6950	2200 6957	2202 6964	2205 6971	2207 6979	2209 6986	2211 6993	0 1	0 1	1 2	1 3	1 4	1 4	2 5	2 6	2 6
49	2214 7000	2216 7007	2218 7014	2220 7021	2223 7029	2225 7036	2227 7043	2229 7050	2232 7057	2234 7064	0 1	0 1	1 2	1 3	1 4	1 4	2 5	2 6	2 6
50	2236 7071	2238 7078	2241 7085	2243 7092	2245 7099	2247 7106	2249 7113	2252 7120	2254 7127	2256 7134	0 1	0 1	1 2	1 3	1 4	1 4	2 5	2 6	2 6
51	2258 7141	2261 7148	2263 7155	2265 7162	2267 7169	2269 7176	2272 7183	2274 7190	2276 7197	2278 7204	0 1	0 1	1 2	1 3	1 4	1 4	2 5	2 6	2 6
52	2280 7211	2283 7218	2285 7225	2287 7232	2289 7239	2291 7246	2294 7253	2296 7259	2298 7266	2300 7273	0 1	0 1	1 2	1 3	1 3	1 4	2 5	2 6	2 6
53	2302 7280	2304 7287	2307 7294	2309 7301	2311 7308	2313 7314	2315 7321	2317 7328	2319 7335	2322 7342	0 1	0 1	1 2	1 3	1 3	1 4	2 5	2 5	2 6
54	2324 7348	2326 7355	2328 7362	2330 7369	2332 7376	2335 7882	2337 7389	2339 7396	2341 7403	2343 7409	0 1	0 1	1 2	1 3	1 3	1 4	1 5	2 5	2 6
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Первая значащая цифра и положение запятой в десятичной дроби определяются предварительно (см. стр. 181).

																		8	9
										2364	0	0	1	1	1	1	1	2	2
								7463	7470	7477	1	1	2	3	3	4	5	5	6
					2375	2377	2379	2381	2383	2385	0	0	1	1	1	1	1	2	2
		7490	7497	7503	7510	7517	7423	7530	7537	7543	1	1	2	3	3	4	5	5	6
57	2387	2390	2392	2394	2396	2398	2400	2402	2404	2406	0	0	1	1	1	1	1	2	2
	7550	7556	7563	7570	7576	7583	7589	7596	7603	7609	1	1	2	3	3	4	5	5	6
58	2408	2410	2412	2415	2417	2419	2421	2423	2425	2427	0	0	1	1	1	1	1	2	2
	7616	7622	7629	7635	7642	7649	7655	7662	7668	7675	1	1	2	3	3	4	5	5	6
59	2429	2431	2433	2435	2437	2439	2441	2443	2445	2447	0	0	1	1	1	1	1	2	2
	7681	7688	7694	7701	7707	7714	7720	7727	7733	7740	1	1	2	3	3	4	5	5	6
60	2449	2452	2454	2456	2458	2460	2462	2464	2466	2468	0	0	1	1	1	1	1	2	2
	7746	7752	7759	7765	7772	7778	7785	7791	7797	7804	1	1	2	3	3	4	4	5	6
61	2470	2472	2474	2476	2478	2480	2482	2484	2486	2488	0	0	1	1	1	1	1	2	2
	7810	7817	7823	7829	7836	7842	7849	7855	7861	7868	1	1	2	3	3	4	4	5	6
62	2490	2492	2494	2496	2498	2500	2502	2504	2506	2508	0	0	1	1	1	1	1	2	2
	7874	7880	7887	7893	7899	7906	7912	7918	7925	7931	1	1	2	3	3	4	4	5	6
63	2510	2512	2514	2516	2518	2520	2522	2524	2526	2528	0	0	1	1	1	1	1	2	2
	7937	7944	7950	7656	7962	7969	7975	7981	7987	7994	1	1	2	3	3	4	4	5	6
64	2530	2532	2534	2536	2538	2540	2542	2544	2546	2548	0	0	1	1	1	1	1	2	2
	8000	8006	8012	8019	8025	8031	8037	8044	8050	8056	1	1	2	2	3	4	4	5	6
65	2550	2551	2553	2555	2557	2559	2561	2563	2565	2567	0	0	1	1	1	1	1	2	2
	8062	8068	8075	8081	8087	8093	8099	8106	8112	8118	1	1	2	2	3	4	4	5	5
66	2569	2571	2573	2575	2577	2579	2581	2583	2585	2587	0	0	1	1	1	1	1	2	2
	8124	8130	8136	8142	8149	8155	8161	8167	8173	8179	1	1	2	2	3	4	4	5	5
67	2588	2590	2592	2594	2596	2598	2600	2602	2604	2606	0	0	1	1	1	1	1	2	2
	8185	8191	8198	8204	8210	8216	8222	8228	8234	8240	1	1	2	2	3	4	4	5	5
68	2608	2610	2612	2613	2615	2617	2619	2621	2623	2625	0	0	1	1	1	1	1	2	2
	8246	8252	8258	8264	8270	8276	8283	8289	8295	8301	1	1	2	2	3	4	4	5	5
69	2627	2629	2631	2632	2634	2636	2638	2640	2642	2644	0	0	1	1	1	1	1	2	2
	8307	8313	8319	8325	8331	8337	8343	8349	8355	8361	1	1	2	2	3	4	4	5	5
70	2646	2648	2650	2651	2653	2655	2657	2659	2661	2663	0	0	1	1	1	1	1	2	2
	8367	8373	8379	8385	8390	8396	8402	8408	8414	8420	1	1	2	2	3	4	4	5	5
71	2665	2666	2668	2670	2672	2674	2676	2678	2680	2681	0	0	1	1	1	1	1	1	2
	8426	8432	8438	8444	8450	8456	8462	8468	8473	8479	1	1	2	2	3	3	4	5	5
72	2683	2685	2687	2689	2691	2693	2694	2696	2698	2700	0	0	1	1	1	1	1	1	2
	8485	8491	8497	8503	8509	8515	8521	8526	8532	8538	1	1	2	2	3	3	4	5	5
73	2702	2704	2706	2707	2709	2711	2713	2715	2717	2718	0	0	1	1	1	1	1	1	2
	8544	8550	8556	8562	8567	8573	8579	8585	8591	8597	1	1	2	2	3	3	4	5	5
74	2720	2722	2724	2726	2728	2729	2731	2733	2735	2737	0	0	1	1	1	1	1	1	2
	8602	8608	8614	8620	8626	8631	8637	8643	8649	8654	1	1	2	2	3	3	4	5	5
75	2739	2740	2742	2744	2746	2748	2750	2751	2753	2755	0	0	1	1	1	1	1	1	2
	8660	8666	8672	8678	8683	8689	8695	8701	8706	8712	1	1	2	2	3	3	4	5	5
76	2757	2759	2760	2762	2764	2766	2768	2769	2771	2773	0	0	1	1	1	1	1	1	2
	8718	8724	8729	8735	8741	8746	8752	8758	8764	8769	1	1	2	2	3	3	4	5	5
7	2775	2777	2778	2780	2782	2784	2786	2787	2789	2791	0	0	1	1	1	1	1	1	2
	8775	8781	8786	8792	8798	8803	8809	8815	8820	8826	1	1	2	2	3	3	4	4	5
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**

ая значащая цифра и положение запятой в десятичной дроби опр
предварительно (см. стр. 181).

КЗАДРАТНЫЕ КОРНИ.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7		
78	2793 8832	2795 8837	2796 8843	2798 8849	2800 8854	2802 8860	2804 8866	2805 8871	2807 8877	2809 8883	0 1	0 1	1 2	1 2	1 3	1 3	1 4		
79	2811 8888	2812 8894	2814 8899	2816 8905	2818 8911	2820 8916	2821 8922	2823 8927	2825 8933	2827 9839	0 1	0 1	1 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	
80	2828 8944	2830 8950	2832 8955	2834 8961	2835 8967	2837 8872	2839 8978	2841 8983	2843 8989	2844 8994	0 1	0 1	1 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	
81	2846 9000	2848 9006	2850 9011	2851 9017	2853 9022	2855 9028	2857 9033	2858 9039	2860 9044	2862 9050	0 1	0 1	1 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	
82	2864 9055	2865 9061	2867 9066	2869 9072	2871 9077	2872 9083	2874 9088	2876 9094	2877 9099	2879 9105	0 1	0 1	1 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	
83	2881 9110	2883 9116	2884 9121	2886 9127	2888 9132	2890 9138	2891 9143	2893 9149	2895 9154	2897 9160	0 1	0 1	1 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	2 5
84	2898 9165	2900 9171	2902 9176	2903 9182	2905 9187	2907 9192	2909 9198	2910 9203	2912 9209	2914 9214	0 1	0 1	1 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	2 5
85	2915 9220	2917 9225	2919 9230	2921 9236	2922 9241	2924 9247	2926 9252	2927 9257	2929 9263	2931 9268	0 1	0 1	1 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	2 5
86	2933 9274	2934 9279	2936 9284	2938 9290	2939 9295	2941 9301	2943 9306	2944 9311	2946 9317	2948 9322	0 1	0 1	1 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	2 5
87	2950 9327	2951 9333	2953 9338	2955 9343	2956 9349	2958 9354	2960 9359	2961 9365	2963 9370	2965 9375	0 1	0 1	1 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	2 5
88	2966 9381	2968 9386	2970 9391	2972 9397	2973 9402	2975 9407	2977 9413	2978 6418	2980 9423	2982 9429	0 1	0 1	1 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	2 5
89	2983 9434	2985 9439	2987 9445	2988 9450	2990 9455	2992 9460	2993 9466	2995 9471	2997 9476	2998 9482	0 1	0 1	1 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	2 5
90	3000 9487	3002 9492	3003 9497	3005 9503	3007 9508	3008 9513	3010 9518	3012 9524	3013 9529	3015 9534	0 1	0 1	0 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	1 5
91	3017 9539	3018 9545	3020 9550	3022 9555	3023 9560	3025 9566	3027 9571	3028 9576	3030 9581	3032 9586	0 1	0 1	0 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	1 5
92	3033 9592	3035 9597	3036 9602	3038 9607	3040 9612	3041 9618	3043 9623	3045 9628	3046 9633	3048 9638	0 1	0 1	0 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	1 5
93	3050 9644	3051 9649	3053 9654	3055 9659	3056 9664	3058 9670	3059 9675	3061 9680	3063 9685	3064 9690	0 1	0 1	0 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	1 5
94	3066 9695	3068 9701	3069 9706	3071 9711	3072 9716	3074 9721	3076 9726	3077 9731	3079 9737	3081 9742	0 1	0 1	0 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	1 5
95	3082 9747	3084 9752	3085 9757	3087 9762	3089 4767	3090 9772	3092 9778	3094 9783	3095 9788	3097 9793	0 1	0 1	0 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	1 5
96	3098 9798	3100 9803	3102 9808	3103 9813	4105 9818	3106 9823	3108 9829	3110 9834	3111 9839	3113 9844	0 1	0 1	0 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	1 5
97	3114 9849	3116 9854	3118 9859	3119 9864	3121 9869	3122 9874	3124 9879	3126 9884	3127 9889	3129 9894	0 1	0 1	0 2	1 2	1 3	1 3	1 4	1 4	1 5
98	3130 98[illegible]9	3132 9905	3134 9910	3135 9915	3137 9920	3138 9925	3140 9930	3142 9935	3143 9940	3145 9945	0 0	0 1	0	1	1	1			
99	3146 9950	3148 9955	3150 9960	3151 9965	3153 9970	3154	3156	3158											

ЛОГАРИФМЫ.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0000	0043	0086	0128	0170						4	9	13	17	21	26	30	34	38
						0212	0253	0294	0334	0374	4	8	12	16	20	24	28	32	37
11	0414	0453	0492	0531	0569						4	8	12	16	19	23	27	31	35
						0607	0645	0682	0719	0755	4	7	11	15	19	22	26	30	33
12	0792	0828	0864	0899	0934	0969					3	7	11	14	18	21	25	28	32
							1004	1038	1072	1106	3	7	10	14	17	20	24	27	31
13	1139	1173	1206	1239	1271						3	7	10	13	16	20	23	26	30
						1303	1335	1367	1399	1430	3	7	10	12	16	19	22	25	29
14	1461	1492	1523	1553	1584						3	6	9	12	15	18	21	24	28
						1614	1644	1673	1703	1732	3	6	9	12	15	17	20	23	27
15	1761	1790	1818	1847	1875	1903					3	6	9	11	14	17	20	23	26
							1931	1959	1987	2014	3	5	8	11	14	16	19	22	25
16	2041	2068	2095	2122	2148						3	5	8	11	14	16	19	22	24
						2175	2201	2227	2253	2279	3	5	8	10	13	15	18	21	23
17	2304	2330	2355	2380	2405	2430					3	5	8	10	13	15	18	20	23
							2455	2480	2504	2529	2	5	7	10	12	15	17	19	22
18	2553	2577	2601	2625	2648						2	5	7	9	12	14	16	19	21
						2672	2695	2718	2742	2765	2	5	7	9	11	14	16	18	21
19	2788	2810	2833	2856	2878						2	4	7	9	11	13	16	18	20
						2900	2923	2945	2967	2989	2	4	6	8	11	13	15	17	19
20	**3010**	**3032**	**3054**	**3075**	**3096**	**3118**	**3139**	**3160**	**3181**	**3201**	**2**	**4**	**6**	**8**	**11**	**13**	**15**	**17**	**19**
21	3222	3243	3263	3284	3304	3324	3345	3365	3385	3404	2	4	6	8	10	12	14	16	18
22	3424	3444	3464	3483	3502	3522	3541	3560	3579	3598	2	4	6	8	10	12	14	15	17
23	3617	3636	3655	3674	3692	3711	3729	3747	3766	3784	2	4	6	7	9	11	13	15	17
24	3802	3820	3838	3856	3874	3892	3909	3927	3945	3962	2	4	5	7	9	11	12	14	16
25	**3979**	**3997**	**4014**	**4031**	**4048**	**4065**	**4082**	**4099**	**4116**	**4133**	**2**	**3**	**5**	**7**	**9**	**10**	**12**	**14**	**15**
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9

ЛОГАРИФМЫ.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
25	**3979**	**3997**	**4014**	**4031**	**4048**	**4065**	**4082**	**4090**	**4116**	**4133**	**2**	**3**	**5**	**7**	**9**	**10**	**12**	**14**	**15**
26	4150	4166	4183	4200	4216	4232	4249	4265	4281	4298	2	3	5	7	8	10	11	13	15
27	4314	4330	4346	4362	4378	4393	4409	4425	4440	4456	2	3	5	6	8	9	11	13	14
28	4472	4487	4502	4518	4533	4548	4564	4579	4594	4609	2	3	5	6	8	9	11	12	14
29	4624	4639	4654	4669	4683	4698	4713	4728	4742	4757	1	3	4	6	7	9	10	12	13
30	**4771**	**4786**	**4800**	**4814**	**4829**	**4843**	**4857**	**4871**	**4886**	**4900**	**1**	**3**	**4**	**6**	**7**	**9**	**10**	**11**	**13**
31	4914	4928	4942	4955	4969	4983	4997	5011	5024	5038	1	3	4	6	7	8	10	11	12
32	5051	5065	5079	5092	5105	5119	5132	5145	5159	5172	1	3	4	5	7	8	9	11	12
33	5185	5198	5211	5224	5237	5250	5263	5276	5289	5302	1	3	4	5	6	8	9	10	12
34	5315	5328	5340	5353	5366	5378	5391	5403	5416	5428	1	3	4	5	6	8	9	10	11
35	**5441**	**5453**	**5465**	**5478**	**5490**	**5502**	**5514**	**5527**	**5539**	**5551**	**1**	**2**	**4**	**5**	**6**	**7**	**9**	**10**	**11**
36	5563	5575	5587	5599	5611	5623	5635	5647	5658	5670	1	2	4	5	6	7	8	10	11
37	5682	5694	5705	5717	5729	5740	5752	5763	5775	5786	1	2	3	5	6	7	8	9	10
38	5798	5809	5821	5832	5843	5855	5866	5877	5888	5899	1	2	3	5	6	7	8	9	10
39	5911	5922	5933	5944	5955	5966	5977	5988	5999	6010	1	2	3	4	5	7	8	9	10
40	**6021**	**6031**	**6042**	**6053**	**6064**	**6075**	**6085**	**6096**	**6107**	**6117**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**8**	**9**	**10**
41	6128	6138	6149	6160	6170	6180	6191	6201	6212	6222	1	2	3	4	5	6	7	8	9
42	6232	6243	6253	6263	6274	6284	6294	6304	6314	6325	1	2	3	4	5	6	7	8	9
43	6335	6345	6355	6365	6375	6385	6395	6405	6415	6425	1	2	3	4	5	6	7	8	9
44	6435	6444	6454	6464	6474	6484	6493	6503	6513	6522	1	2	3	4	5	6	7	8	9
45	**6532**	**6542**	**6551**	**6561**	**6571**	**6580**	**6590**	**6599**	**6609**	**6618**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
46	6628	6637	6646	6656	6665	6675	6684	6693	6702	6712	1	2	3	4	5	6	7	7	8
47	6721	6730	6739	6749	6758	6767	6776	6785	6794	6803	1	2	3	4	5	5	6	7	8
48	6812	6821	6830	6839	6848	6857	6866	6875	6884	6893	1	2	3	4	4	5	6	7	8
49	6902	6911	6920	6928	6937	6946	6955	6964	6972	6981	1	2	3	4	4	5	6	7	8
50	**6990**	**6998**	**7007**	**7016**	**7024**	**7033**	**7042**	**7050**	**7059**	**7067**	**1**	**2**	**3**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9

ЛОГАРИФМЫ.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	**6990**	**6998**	**7007**	**7016**	**7024**	**7033**	**7042**	**7050**	**7059**	**7067**	**1**	**2**	**3**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
51	7076	7084	7093	7101	7110	7118	7126	7135	7143	7152	1	2	3	3	4	5	6	7	8
52	7160	7168	7177	7185	7193	7202	7210	7218	7226	7235	1	2	2	3	4	5	6	7	7
53	7243	7251	7259	7267	7275	7284	7292	7300	7308	7316	1	2	2	3	4	5	6	6	7
54	7324	7332	7340	7348	7356	7364	7372	7380	7388	7396	1	2	2	3	4	5	6	6	7
55	**7404**	**7412**	**7419**	**7427**	**7435**	**7443**	**7451**	**7459**	**7466**	**7.74**	**1**	**2**	**2**	**3**	**4**	**5**	**5**	**6**	**7**
56	7482	7490	7497	7505	7513	7520	7528	7536	7543	7551	1	2	2	3	4	5	5	6	7
57	7559	7566	7574	7582	7589	7597	7604	7612	7619	7627	1	2	2	3	4	5	5	6	7
58	7634	7642	7649	7657	7664	7672	7679	7686	7694	7701	1	1	2	3	4	4	5	6	7
59	7709	7716	7723	7731	7738	7745	7752	7760	7767	7774	1	1	2	3	4	4	5	6	7
60	**7782**	**7789**	**7796**	**7803**	**7810**	**7818**	**7825**	**7832**	**7839**	**7846**	**1**	**1**	**2**	**3**	**4**	**4**	**5**	**6**	**6**
61	7853	7860	7868	7875	7882	7889	7896	7903	7910	7917	1	1	2	3	4	4	5	6	6
62	7924	7931	7938	7945	7952	7959	7966	7973	7980	7987	1	1	2	3	3	4	5	6	6
63	7993	8000	8007	8014	8021	8028	8035	8041	8048	8055	1	1	2	3	3	4	5	5	6
64	8062	8069	8075	8082	8089	8096	8102	8109	8116	8122	1	1	2	3	3	4	5	5	6
65	**8129**	**8136**	**8142**	**8149**	**8156**	**8162**	**8169**	**8176**	**8182**	**8189**	**1**	**1**	**2**	**3**	**3**	**4**	**5**	**5**	**6**
66	8195	8202	8209	8215	8222	8228	8235	8241	8248	8254	1	1	2	3	3	4	5	5	6
67	8261	8267	8274	8280	8287	8293	8299	8306	8312	8319	1	1	2	3	3	4	5	5	6
68	8325	8331	8338	8344	8351	8357	8363	8370	8376	8382	1	1	2	3	3	4	4	5	6
69	8388	8395	8401	8407	8414	8420	8426	8432	8439	8445	1	1	2	2	3	4	4	5	6
70	**8451**	**8457**	**8463**	**8470**	**8476**	**8482**	**8488**	**8494**	**8500**	**8506**	**1**	**1**	**2**	**2**	**3**	**4**	**4**	**5**	**6**
71	8513	8519	8525	8531	8537	8543	8549	8555	8561	8567	1	1	2	2	3	4	4	5	5
72	8573	8579	8585	8591	8597	8603	8609	8615	8621	8627	1	1	2	2	3	4	4	5	5
73	8633	8639	8645	8651	8657	8663	8669	8675	8681	8686	1	1	2	2	3	4	4	5	5
74	8692	8698	8704	8710	8716	8722	8727	8733	8739	8745	1	1	2	2	3	4	4	5	5
75	**8751**	**8756**	**8762**	**8768**	**8674**	**8779**	**8785**	**8791**	**8797**	**8802**	**1**	**1**	**2**	**2**	**3**	**3**	**4**	**5**	**5**
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9

ЛОГАРИФМЫ.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
75	**8751**	**8756**	**8762**	**8768**	**8774**	**8779**	**8785**	**8791**	**8797**	**8802**	**1**	**1**	**2**	**2**	**3**	**3**	**4**	**5**	**5**
76	8808	8814	8820	8825	8831	8837	8842	8848	8854	8859	1	1	2	2	3	3	4	5	5
77	8865	8871	8876	8882	8887	8893	8899	8904	8910	8915	1	1	2	2	3	3	4	4	5
78	8921	8927	8932	8938	8943	8949	8954	8960	8965	8971	1	1	2	2	3	3	4	4	5
79	8976	8982	8987	8993	8998	9004	9009	9015	9020	9025	1	1	2	2	3	3	4	4	5
80	**9031**	**9036**	**9042**	**9047**	**9053**	**9058**	**9063**	**9069**	**9074**	**9079**	**1**	**1**	**2**	**2**	**3**	**3**	**4**	**4**	**5**
81	9085	9090	9096	9101	9106	9112	9117	9122	9128	9133	1	1	2	2	3	3	4	4	5
82	9138	9143	9149	9154	9159	9165	9170	9175	9180	9186	1	1	2	2	3	3	4	4	5
83	9191	9196	9201	9206	9212	9217	9222	9227	9232	9238	1	1	2	2	3	3	4	4	5
84	9243	9248	9253	9258	9263	9269	9274	6279	9284	9289	1	1	2	2	3	3	4	4	5
85	**9294**	**9299**	**9304**	**9309**	**9315**	**9320**	**9325**	**9330**	**9335**	**9340**	**1**	**1**	**2**	**2**	**3**	**3**	**4**	**4**	**5**
86	9395	9350	9355	9360	9365	9370	9375	9380	9385	9390	1	1	2	2	3	3	4	4	5
87	9395	9400	9405	9410	9415	9420	9425	9430	9435	9440	0	1	1	2	2	3	3	4	4
88	9445	9450	9455	9460	9465	9469	9474	9479	9484	9489	0	1	1	2	2	3	3	4	4
89	9494	9499	9504	9509	9513	9518	9523	9528	9533	9538	0	1	1	2	2	3	3	4	4
90	**9542**	**9547**	**9552**	**9557**	**9562**	**9566**	**9571**	**9576**	**9581**	**9586**	**0**	**1**	**1**	**2**	**2**	**3**	**3**	**4**	**4**
91	9590	9595	9600	9605	9609	9614	9619	9624	9628	9633	0	1	1	2	2	3	3	4	4
92	9638	9643	9647	9652	9657	9661	9666	9671	9675	9680	0	1	1	2	2	3	3	4	4
93	9685	9689	9694	9699	9703	9708	9713	9717	9722	9727	0	1	1	2	2	3	3	4	4
94	9731	9736	9741	9745	9750	9754	9759	9763	9768	9773	0	1	1	2	2	3	3	4	4
95	**9777**	**9782**	**9786**	**9791**	**9795**	**9800**	**9805**	**9809**	**9814**	**9818**	**0**	**1**	**1**	**2**	**2**	**3**	**3**	**4**	**4**
96	9823	9827	9832	9836	9841	9845	9850	9854	9859	9863	0	1	1	2	2	3	3	4	4
97	9868	9872	9877	9881	9886	9890	9894	9899	9903	9908	0	1	1	2	2	3	3	4	4
98	9912	9917	9921	9926	9930	9934	9939	9943	9948	9952	0	1	1	2	2	3	3	4	4
99	9956	9961	9965	9969	9974	9978	9983	9987	9991	9996	0	1	1	2	2	3	3	3	4
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9

АНТИЛОГАРИФМЫ.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
·00	**1000**	**1002**	**1005**	**1007**	**1009**	**1012**	**1014**	**1016**	**1019**	**1021**	**0**	**0**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**2**	**2**
·01	1023	1026	1028	1030	1033	1035	1038	1040	1042	1045	0	0	1	1	1	1	2	2	2
·02	1047	1050	1052	1054	1057	1059	1062	1064	1067	1069	0	0	1	1	1	1	2	2	2
·03	1072	1074	1076	1079	1081	1084	1086	1089	1091	1094	0	0	1	1	1	1	2	2	2
·04	1096	1099	1102	1104	1107	1109	1112	1114	1117	1119	0	1	1	1	1	2	2	2	2
·05	**1122**	**1125**	**1127**	**1130**	**1132**	**1135**	**1138**	**1140**	**1143**	**1146**	**0**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**2**	**2**	**2**
·06	1148	1151	1153	1156	1159	1161	1164	1167	1169	1172	0	1	1	1	1	2	2	2	2
·07	1175	1178	1180	1183	1186	1189	1191	1194	1197	1199	0	1	1	1	1	2	2	2	2
·08	1202	1205	1208	1211	1213	1216	1219	1222	1225	1227	0	1	1	1	1	2	2	2	3
·09	1230	1233	1236	1239	1242	1245	1247	1250	1253	1256	0	1	1	1	1	2	2	2	3
·10	**1259**	**1262**	**1265**	**1268**	**1271**	**1274**	**1276**	**1279**	**1282**	**1285**	**0**	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**	**2**	**2**	**3**
·11	1288	1291	1294	1297	1300	1303	1309	1309	1312	1315	0	1	1	1	2	2	2	2	3
·12	1318	1321	1324	1327	1330	1334	1337	1340	1343	1346	0	1	1	1	2	2	2	2	3
·13	1349	1352	1355	1358	1361	1365	1368	1371	1374	1377	0	1	1	1	2	2	2	3	3
·14	1380	1384	1387	1390	1393	1396	1400	1403	1406	1409	0	1	1	1	2	2	2	3	3
·15	**1413**	**1416**	**1419**	**1422**	**1426**	**1429**	**1432**	**1435**	**1439**	**1442**	**0**	**1**	**1**	**1**	**2**	**2**	**2**	**3**	**3**
·16	1445	1449	1452	1455	1459	1462	1466	1469	1472	1476	0	1	1	1	2	2	2	3	3
·17	1479	1483	1486	1489	1493	1496	1500	1503	1507	1510	0	1	1	1	2	2	2	3	3
·18	1514	1517	1521	1524	1528	1531	1535	1538	1542	1545	0	1	1	1	2	2	2	3	3
·19	1549	1552	1556	1560	1563	1567	1570	1574	1578	1581	0	1	1	1	2	2	3	3	3
·20	**1585**	**1589**	**1592**	**1596**	**1600**	**1603**	**1607**	**1611**	**1614**	**1618**	**0**	**1**	**1**	**1**	**2**	**2**	**3**	**3**	**3**
·21	1622	1626	1629	1633	1637	1641	1644	1648	1652	1656	0	1	1	2	2	2	3	3	3
·22	1660	1663	1667	1671	1675	1679	1683	1687	1690	1694	0	1	1	2	2	2	3	3	3
·23	1698	1702	1706	1710	1714	1718	1722	1726	1730	1734	0	1	1	2	2	2	3	3	4
·24	1738	1742	1746	1750	1754	1758	1762	1766	1770	1774	0	1	1	2	2	2	3	3	4
·25	**1778**	**1782**	**1786**	**1791**	**1795**	**1799**	**1803**	**1807**	**1811**	**1816**	**0**	**1**	**1**	**2**	**2**	**2**	**3**	**3**	**4**
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9

АНТИЛОГАРИФМЫ.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
·25	**1778**	**1782**	**1786**	**1791**	**1795**	**1799**	**1803**	**1807**	**1811**	**1816**	**0**	**1**	**1**	**2**	**2**	**2**	**3**	**3**	**4**
·26	1820	1824	1828	1832	1837	1841	1845	1849	1854	1858	0	1	1	2	2	3	3	3	4
·27	1862	1866	1871	1875	1879	1884	1888	1892	1897	1901	0	1	1	2	2	3	3	3	4
·28	1905	1910	1914	1919	1923	1928	1932	1936	1941	1945	0	1	1	2	2	3	3	4	4
·29	1950	1954	1959	1963	1968	1972	1977	1982	1986	1991	0	1	1	2	2	3	3	4	4
·30	**1995**	**2000**	**2004**	**2009**	**2014**	**2018**	**2023**	**2028**	**2032**	**2037**	**0**	**1**	**1**	**2**	**2**	**3**	**3**	**4**	**4**
·31	2042	2046	2051	2056	2061	2065	2070	2075	2080	2084	0	1	1	2	2	3	3	4	4
·32	2089	2094	2099	2104	2109	2113	2118	2123	2128	2133	0	1	1	2	2	3	3	4	4
·33	2138	2143	2148	2153	2158	2163	2168	2173	2178	2183	0	1	1	2	2	3	3	4	4
·34	2188	2193	2198	2203	2208	2213	2218	2223	2228	2234	1	1	2	2	3	3	4	4	5
·35	**2239**	**2244**	**2249**	**2254**	**2259**	**2265**	**2270**	**2275**	**2280**	**2286**	**1**	**1**	**2**	**2**	**3**	**3**	**4**	**4**	**5**
·36	2291	2296	2301	2307	2312	2317	2323	2328	2333	2339	1	1	2	2	3	3	4	4	5
·37	2344	2350	2355	2360	2366	2371	2377	2382	2388	2393	1	1	2	2	3	3	4	4	5
·38	2399	2404	2410	2415	2421	2427	2432	2438	2443	2449	1	1	2	2	3	3	4	4	5
·39	2455	2460	2466	2472	2477	2483	2489	2495	2500	2506	1	1	2	2	3	3	4	5	5
·40	**2512**	**2518**	**2523**	**2529**	**2535**	**2541**	**2547**	**2553**	**2559**	**2564**	**1**	**1**	**2**	**2**	**3**	**4**	**4**	**5**	**5**
·41	2570	2576	2582	2588	2594	2600	2606	2612	2618	2624	1	1	2	2	3	4	4	5	5
·42	2630	2636	2642	2649	2655	2661	2667	2673	2679	2685	1	1	2	2	3	4	4	5	6
·43	2692	2698	2704	2710	2716	2723	2729	2735	2742	2748	1	1	2	3	3	4	4	5	6
·44	2754	2761	2767	2773	2780	2786	2793	2799	2805	2812	1	1	2	3	3	4	4	5	6
·45	**2818**	**2825**	**2831**	**2838**	**2844**	**2851**	**2858**	**2864**	**2871**	**2877**	**1**	**1**	**2**	**3**	**3**	**4**	**5**	**5**	**6**
·46	2884	2891	2897	2904	2911	2917	2924	2931	2938	2944	1	1	2	3	3	4	5	5	6
·47	2951	2958	2965	2972	2979	2985	2992	2999	3006	3013	1	1	2	3	3	4	5	5	6
·48	3020	3027	3034	3041	3048	3055	3062	3069	3076	3083	1	1	2	3	4	4	5	6	6
·49	3090	3097	3105	3112	3119	3126	3133	3141	3148	3155	1	1	2	3	4	4	5	6	6
·50	**3162**	**3170**	**3177**	**3184**	**3192**	**3199**	**3206**	**3214**	**3221**	**3228**	**1**	**1**	**2**	**3**	**4**	**4**	**5**	**6**	**6**
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9

АНТИЛОГАРИФМЫ.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	**3162**	**3170**	**3177**	**3184**	**3192**	**3199**	**3206**	**3214**	**3221**	**3228**	**1**	**1**	**2**	**3**	**4**	**4**	**5**	**6**	**7**
·51	3236	3243	3251	3258	3266	3273	3281	3289	3296	3304	1	2	2	3	4	5	5	6	7
·52	3311	3319	3327	3334	3342	3350	3357	3365	3373	3381	1	2	2	3	4	5	5	6	7
·53	3388	3396	3404	3412	3420	3428	3436	3443	3451	3459	1	2	2	3	4	5	6	6	7
·54	3467	3475	3483	3491	3499	3508	3516	3524	3532	3540	1	2	2	3	4	5	6	6	7
·55	**3548**	**3556**	**3565**	**3573**	**3581**	**3589**	**3597**	**3606**	**3614**	**3622**	**1**	**2**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**7**
·56	3631	3639	3648	3656	3664	3673	3681	3690	3698	3707	1	2	3	3	4	5	6	7	8
·57	3715	3724	3733	3741	3750	3758	3767	3776	3784	3793	1	2	3	3	4	5	6	7	8
·58	3802	3811	3819	3828	3837	3846	3855	3864	3873	3882	1	2	3	4	4	5	6	7	8
·59	3890	3899	3908	3917	3926	3936	3945	3954	3963	3972	1	2	3	4	5	5	6	7	8
·60	**3981**	**3990**	**3999**	**4009**	**4018**	**4027**	**4036**	**4046**	**4055**	**4064**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**6**	**7**	**8**
·61	4074	4083	4093	4102	4111	4121	4130	4140	4150	4159	1	2	3	4	5	6	7	8	9
·62	4169	4178	4188	4198	4207	4217	4227	4236	4246	4256	1	2	3	4	5	6	7	8	9
·63	4266	4276	4285	4295	4305	4315	4325	4335	4345	4355	1	2	3	4	5	6	7	8	9
·64	4365	4375	4385	4395	4406	4416	4426	4436	4446	4457	1	2	3	4	5	6	7	8	9
·65	**4467**	**4477**	**4487**	**4498**	**4508**	**4519**	**4529**	**4539**	**4550**	**4560**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
·66	4571	4581	4592	4603	4613	4624	4634	4645	4656	4667	1	2	3	4	5	6	7	9	10
·67	4677	4688	4699	4710	4721	4732	4742	4753	4764	4775	1	2	3	4	5	7	8	9	10
·68	4786	4797	4808	4819	4831	4842	4853	4864	4875	4887	1	2	3	4	6	7	8	9	10
·69	4898	4909	4920	4932	4943	4955	4966	4977	4989	5000	1	2	3	5	6	7	8	9	10
·70	**5012**	**5023**	**5035**	**4047**	**5058**	**5070**	**5082**	**5093**	**5105**	**5117**	**1**	**2**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**11**
·71	5129	5140	5152	5164	5176	5188	5200	5212	5224	5236	1	2	4	5	6	7	8	10	11
·72	5248	5260	5272	5284	5297	5309	5321	5333	5346	5358	1	2	4	5	6	7	9	10	11
·73	5370	5383	5395	5408	5420	5433	5445	5458	5470	5483	1	3	4	5	6	8	9	10	11
·74	5495	5508	5521	5534	5546	5559	5572	5585	5598	5610	1	3	4	5	6	8	9	10	12
·75	**5623**	**5636**	**5649**	**5662**	**5675**	**5689**	**5702**	**5715**	**5728**	**5741**	**1**	**3**	**4**	**5**	**7**	**8**	**9**	**10**	**12**
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9

АНТИЛОГАРИФМЫ.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
·75	**5623**	**5636**	**5649**	**5662**	**5675**	**5689**	**5702**	**5715**	**5728**	**5741**	**1**	**3**	**4**	**5**	**7**	**8**	**9**	**10**	**12**
·76	5754	5768	5781	5794	5808	5821	5834	5848	5861	5875	1	3	4	5	7	8	9	11	12
·77	5888	5902	5916	5929	5943	5957	5970	5984	5998	6012	1	3	4	5	7	8	10	11	12
·78	6026	6039	6053	6067	6081	6095	6109	6124	6138	6152	1	3	4	6	7	8	10	11	13
·79	6166	6180	6194	6209	6223	6237	6252	6266	6281	6295	1	3	4	6	7	9	10	11	13
·80	**6310**	**6324**	**6339**	**6353**	**6368**	**6383**	**6397**	**6412**	**6427**	**6442**	**1**	**3**	**4**	**6**	**7**	**9**	**10**	**12**	**13**
·81	6457	6471	6486	6501	6516	6531	6546	6561	6577	6592	2	3	5	6	8	9	11	12	14
·82	6607	6622	6637	6653	6668	6683	6699	6714	6730	6745	2	3	5	6	8	9	11	12	14
·83	6761	6776	6792	6808	6823	6839	6855	6871	6887	6902	2	3	5	6	8	9	11	13	14
·84	6918	6934	6950	6966	6982	6998	7015	7031	7047	7063	2	3	5	6	8	10	11	13	15
·85	**7079**	**7096**	**7112**	**7129**	**7145**	**7161**	**7178**	**7194**	**7211**	**7228**	**2**	**3**	**5**	**7**	**8**	**10**	**12**	**13**	**15**
·86	7244	7261	7278	7295	7311	7328	7345	7362	7379	7396	2	3	5	7	8	10	12	13	15
·87	7413	7430	7447	7464	7482	7499	7516	7534	7551	7568	2	3	5	7	9	10	12	14	16
·88	7586	7603	7621	7638	7656	7674	7691	7709	7727	7745	2	4	5	7	9	11	12	14	16
·89	7762	7780	7798	7816	7834	7852	7870	7889	7907	7925	2	4	5	7	9	11	13	14	16
·90	**7943**	**7962**	**7980**	**7998**	**8017**	**8035**	**8054**	**8072**	**8091**	**8110**	**2**	**4**	**6**	**7**	**9**	**11**	**13**	**15**	**17**
·91	8128	8147	8166	8185	8204	8222	8241	8260	8279	8299	2	4	6	8	9	11	13	15	17
·92	8318	8337	8356	8375	8395	8414	8433	8453	8472	8492	2	4	6	8	10	12	14	15	17
·93	8511	8531	8551	8570	8590	8610	8630	8650	8670	8690	2	4	6	8	10	12	14	16	18
·94	8710	8730	8750	8770	8790	8810	8831	8851	8872	8892	2	4	6	8	10	12	14	16	18
·95	**8913**	**8933**	**8954**	**8974**	**8995**	**9016**	**9036**	**9057**	**9078**	**9099**	**2**	**4**	**6**	**8**	**10**	**12**	**15**	**17**	**19**
·96	9120	9141	9162	9183	9204	9226	9247	9268	9290	9311	2	4	6	8	11	13	15	17	19
·97	9333	9354	9376	9397	9419	9441	9462	9484	9506	9528	2	4	7	9	11	13	15	17	20
·98	9550	9572	9594	9616	9638	9661	9683	9705	9727	9750	2	4	7	9	11	13	16	18	20
·99	9772	9795	9817	9840	9863	9886	9908	9931	9954	9977	2	5	7	9	11	14	16	18	20
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9

ОГЛАВЛЕНИЕ.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ.

Стр.

Предисловие III

ОТДЕЛ ПЕРВЫЙ.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ПОНЯТИЯ.

Глава I. Алгебраическое законоположение 9

1. Употребление букв. 2. Алгебраическое выражение. 3. Действия, рассматриваемые в алгебре. 4. Знаки, употребляемые в алгебре. 5. Исторические сведения.

Глава II. Свойства первых четырех арифметических действий . . . 14

6. Сложение. 7. Вычитание. 8. Умножение. 9. Деление. 10. Замечание. 11. Применения свойств действий.

Глава III. Положительные и отрицательные числа (относительные числа) 23

I. Понятие о величинах, которые можно понимать в двух противоположных смыслах . . . . —

12. Задача 1-я. Задача 2-я. 13. Другие величины, которые можно понимать в двух противоположных смыслах. 14. Относительные числа. 15. Изображение чисел помощью отрезков прямой.

II. Сложение относительных чисел 28

16. Задача. 17. Сложение двух чисел. 18. Другое выражение правил сложения. 19. Сложение 3-х и более чисел.

III. Вычитание относительных чисел 30

20. Задача. 21. Нахождение разности, как одного из двух слагаемых.

22. Правило вычитания. 23. Формулы двойных знаков.

24. Алгебраическая сумма и разность.

IV. Главнейшие свойства сложения и вычитания относительных чисел (§ 25) 34

V. Умножение относительных чисел 36

26. Определение. 27. Вывод правила. 28. Задача. 29. Произведение трех и более чисел

Стр.

VI. Деление относительных чисел 42

30. Определение. 31. Вывод правила. 32. Другое правило деления. 33. Случаи, когда делимое или делитель есть нуль.

VII. Некоторые свойства умножения и деления (§ 34) 43

Глава IV. Понятие об уравнении 47

35. Равенства и их свойства. 36. Тождества. 37. Уравнение. 38 Примеры решения других уравнений. 39. Два основных свойства уравнения. 40. Члены уравнения. 41. Перенесение членов уравнения.

ОТДЕЛ ВТОРОЙ.

ТОЖДЕСТВЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ.

Глава I. Многочлен и одночлен 53

42. Многочлен и одночлен. 43. Коэффициент. 44. Свойства многочлена. 45. Приведение подобных членов.

Глава II. Алгебраическое сложение и вычитание 57

46. Что представляют собою „алгебраические действия“. 47. Сложение одночленов. 48. Сложение многочленов. 49. Вычитание одночленов. 50. Вычитание многочленов. 51. Раскрытие скобок, перед которыми стоит знак + или — . 52. Заключение в скобки части многочлена.

Глава III. Алгебраическое умножение 61

53. Умножение степеней одного и того же числа. 54. Умножение одночленов. 55. Умножение многочлена на одночлен. 56. Умножение многочлена на многочлен. 57. Расположенный многочлен. 58. Умножение расположенных многочленов. 59. Высший и низший члены произведения. 60. Число членов произведения. 61. Некоторые формулы умножения двучленов. 62. Геометрическое истолкование некоторых формул. 63. Применения.

Глава IV. Алгебраическое деление 69

64. Деление степеней одного и того же числа. 65. Нулевой показатель. 66. Деление одночленов. 67. Признаки невозможности деления одночленов. 68. Деление многочлена на одночлен. 69. Деление одночлена на многочлен. 70. Деление многочлена на многочлен. 71. Примеры. 72. Признаки невозможности деления многочленов.

Глава V. Разложение на множители 75

73. Предварительное замечание. 74. Разложение целых одночленов. 75. Разложение многочленов.

Глава VI. Алгебраические дроби 78

76. Отличие алгебраической дроби от арифметической. 77. Основное свойство дроби. 78. Приведение членов дроби к целому виду. 79. Перемена знаков у членов дроби. 80. Сокращение дробей. 81. Приведение дробей к общему знаменателю. 82. Сложение и вычитание дробей. 83. Умножение дробей. 84. Деление дробей. 85. Замечание. 86. Освобождение уравнения от знаменателей.

Стр.

Глава VII. **Отношение и пропорция.** 85

87. Отношение. 88. Зависимость между отношением и его членами. 89. Приведение членов отношения к целому виду. 90. Сокращение отношения. 91. Обратные отношения. 92. Пропорция. 93. Основное свойство числовой пропорции. 94. Обратное предложение. 95. Следствие. 96. Среднее геометрическое. 97. Среднее арифметическое 98. Производные пропорции. 99. Свойство равных отношений. 100. Арифметическое применение. (Пропорциональное деление). 101. Геометрическое применение.

Глава VIII. **Пропорциональная зависимость** (прямая и обратная) . . 96

102. Пропорциональная зависимость. 103. Выражение пропорциональной зависимости формулой. 104. Обратная пропорциональная зависимость. 105. Выражение обратной пропорциональной зависимости формулой.

ОТДЕЛ ТРЕТИЙ.

ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ФУНКЦИЙ.

Глава I. **Понятие о функции и координатах** 101

106. Понятие о функции. 107. График температуры, влажности и пр. 108. Координаты точки.

Глава II. **График пропорциональной зависимости** (прямой и обратной) 107

109. График пропорциональной зависимости. 110. Замечание. 111. Изменение положения прямой в зависимости от коэффициента пропорциональности. 112. График обратной пропорциональности.

Глава III. **График двучлена первой степени** 112

113. Задача. 114. Двучлен первой степени. 115. График двучлена первой степени. 116. Изменение двучлена. 117. Замечания. 118. Построение прямой $y = ax + b$ по двум точкам. 119. Графическое решение уравнения.

ОТДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УРАВНЕНИЯХ. НЕРАВЕНСТВА.

Глава I **Пересмотр двух основных свойств уравнения** 121

120. Предварительное разъяснение. 121. Первое свойство уравнений. 122. Второе свойство. 123. Умножение или деление частей уравнения на одно и то же алгебраическое выражение. 124. Посторонние корни.

Глава II. **Решения положительные, отрицательные, нулевые и другие** 127

125. Общий вид уравнения первой степени с одним неизвестным. 126. Положительное решение. 127. Отрицательное решение. 128. Нулевое решение. 129. Случай, когда уравнение не имеет корня. 130. Как можно понимать равенство $x = \frac{b}{0}$. 131. Неопределенное решение. 132. Графическое истолкование решений ур-ия $ax = b$. 133. Буквенные уравнения.

Стр.

Глава III. **Неравенства первой степени** 135

134. Определение понятий „больше“ и „меньше“. 135. Свойства неравенств. 136. Решение неравенства 1-й степени с одним неизвестным.

ОТДЕЛ ПЯТЫЙ.

СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ПЕРВОЙ СТЕПЕНИ.

Глава I. **Система двух уравнений с двумя неизвестными** 140

137. Задача. 138. Нормальный вид уравнения первой степени с 2 неизвестными. 139. Неопределенность одного уравнения с 2 неизвестными. 140. Система уравнений. 141. Способ подстановки. 142. Способ сложения или вычитания. 143. Графическое решение.

Глава II. **Система трех уравнений с тремя неизвестными** 147

144. Нормальный вид уравнения первой степени с 3 неизвестными. 145. Неопределенность двух и одного уравнения с 3 неизвестными. 146. Система 3 уравнений с 3 неизвестными. 147. Способ подстановки. 148. Способ сложения или вычитания.

Глава III. **Некоторые особые случаи систем уравнений** 150

149. Случай, когда не все неизвестные входят в каждое уравнение. 150. Случай, когда неизвестные входят в виде дробей: $1/x$, $1/y$. 151. Случай, когда полезно все данные уравнения сложить.

ОТДЕЛ ШЕСТОЙ.

СТЕПЕНИ И КОРНИ.

Глава I. **Возвышение в квадрат одночленных алгебраических выражений** 153

152. Определение степени. 153. Правило знаков при возвышении в квадрат. 154. Возвышение в квадрат произведения, частного и степени.

Глава II. **Возвышение в квадрат многочлена** 155

155. Вывод формулы. 156. Замечание о знаках. 157. Сокращенное возвышение в квадрат целых чисел.

Глава III. **Графическое изображение функций:** $y = x^2$ и $y = ax^2$ . . . 158

158. График функции $y = x^2$. 159. График функции $y = ax^2$.

Глава IV. **Возвышение в куб и в другие степени одночленных алгебраических выражений** 161

160. Правило знаков при возвышении в степень. 161. Возвышение в степень произведения, степени и дроби.

Глава V. **Графическое изображение функций:** $y = x^3$ и $y = ax^3$ . . . 162

162. График функции $y = x^3$. 163. График функции $y = ax^3$.

Глава VI. **Основные свойства извлечения корня** 164

164. Задачи. 165. Определение корня. 166. Арифметический корень. 167. Алгебраический корень. 168. Извлечение корня из произведения, из степени и из дроби. 169. Простейшие преобразования радикалов.

Стр.

ОТДЕЛ СЕДЬМОЙ.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИЗ ЧИСЕЛ КВАДРАТНОГО КОРНЯ.

Глава I. **Извлечение из данного целого числа наибольшего целого квадратного корня** 171

170. Предварительные замечания. 171. Извлечение корня из числа, меньшего 10000, но большего 100. 172. Извлечение корня из числа, большего 10000. Правило. 173. Число цифр в корне.

Глава II. **Извлечение приближенных квадратных корней** 177

174. Признаки точного квадратного корня. 175. Приближенный корень с точностью до 1. 176. Приближенный корень с точностью до $^1/_{10}$. 177. Приближенный квадратный корень с точностью до $^1/_{100}$ до $^1/_{1000}$ и т. д. 178. Описание таблицы квадратных корней. 179. Извлечение квадратных корней из обыкновенных дробей.

Глава III. **График функции: $y = \sqrt{x}$** 185

180. Обратная функция. 181. График функции $y = \sqrt{x}$. 182. Соотношение между графиками прямой и обратной функции.

ОТДЕЛ ВОСЬМОЙ.

ДЕЙСТВИЯ НАД ИРРАЦИОНАЛЬНЫМИ ЧИСЛАМИ И ВЫРАЖЕНИЯМИ.

Глава I. **Понятие об иррациональном числе** 188

183. Соизмеримые и несоизмеримые с единицею значения величины. 184. Понятие об измерении. 185. Иррациональные числа. 186. Приближенные значения иррационального числа. 187. Определение действий над иррациональными числами.

Глава II. **Иррациональные значения радикалов** 193

188. Приближенные корни любой степени. 189. Иррациональные значения корня.

Глава III. **Понятие о приближенных вычислениях** 196

190. Предварительное замечание. 191. Приближения с недостатком и с избытком. 192. Десятичные приближения. 193. Погрешность приближенной суммы. 194. Погрешность приближенной разности. 195. Погрешность приближенного произведения. 196. Сокращенное умножение. 197. Погрешность приближенного частного. 198. Сокращенное деление. 199. Замечание. 200. Задача на приближенное вычисление.

Глава IV. **Преобразование иррациональных выражений** 210

201. Рациональные и иррациональные алгебраические выражения. 202. Основное свойство радикала. 203. Некоторые преобразования радикалов. 204. Подобные радикалы. 205. Действия над иррациональными одночленами: 1) Сложение и вычитание. 2) Умножение. 3) Деление. 4) Возвышение в степень. 5) Извлечение корня. 206. Действия над иррациональными многочленами. 207. Освобождение знаменателя дроби от радикалов.

Стр.

ОТДЕЛ ДЕВЯТЫЙ.

НЕКОТОРЫЕ УРАВНЕНИЯ СТЕПЕНИ ВЫШЕ ПЕРВОЙ.

Глава I. **Квадратное уравнение** 218
208. Задача. 209. Нормальный вид кв. уравнения. 210. Решение неполных кв. уравнений. 211. Двучлен второй степени. 212. График двучлена второй степени. 213. Корни неполных кв. уравнений в графическом изображении. 214. Примеры решения полных кв. уравнений. 215. Формула корней приведенного кв. уравнения. 216. Общая формула корней кв. уравнения. 217. Упрощение формулы, когда b есть четное число. 218. Число корней кв. уравнения. 219. Два свойства корней кв. уравнения. Следствия.

Глава II. **Трехчлен второй степени и его графическое изображение.** 229
220. Трехчлен второй степени. 221. Разложение трехчлена x^2+px+q на множители первой степени относительно x. 222. Разложение трехчлена ax^2+bx+c. 223. Следствие (по данным корням составить кв. уравнение). 224. График трехчлена второй степени. 225. Замечание. 226. Графическое решение полного кв. уравнения. 227. Наибольшее и наименьшее значение трехчлена. 228. Изменение трехчлена. 228,$_2$. Решение неравенства второй степени.

Глава III. **Биквадратное уравнение и некоторые другие** 243
229. Биквадратное уравнение. 230. Уравнения, у которых левая часть разложена на множителей, а правая есть нуль.

Глава IV. **Иррациональные уравнения** 245
231. Задача. 232. Посторонние решения. 233. Возвышение частей уравнения в квадрат может ввести посторонние решения. 234. Освобождение уравнения от двух квадр. радикалов.

Глава V. **Системы уравнений второй степени** 249
235. Степень уравнения с несколькими неизвестными. 236. Система двух уравнений, из которых одно первой степени, а другое второй. 237. Система двух уравнений, из которых каждое второй степени. 238. Графический способ решения.

ОТДЕЛ ДЕСЯТЫЙ.

ПРОГРЕССИИ.

Глава I. **Арифметическая прогрессия** 254
239. Задача. 240. Определение. 241. Формула любого члена А. П. 242. Формула суммы всех членов. 243. Замечание. 244. Формула суммы квадратов чисел натурального ряда.

Глава II. **Геометрическая прогрессия** 260
245. Задача. 246. Определение. 247. Сравнение Г. П. с А. П. 248. Формула любого члена. 249. Формула суммы всех членов. 250. Пример задачи на Г. П.

Стр.

Глава III. Бесконечные прогрессии 265
251. Некоторые свойства таких прогрессий. 252. Понятие о пределе. 253. Формула предела суммы членов убывающей Г. П. 254. Применение к десятичным периодическим дробям.

ОТДЕЛ ОДИННАДЦАТЫЙ.

ОБОБЩЕНИЕ ПОНЯТИЯ О ПОКАЗАТЕЛЯХ.

Глава I. Целые показатели 272
255. Перечисление свойств целых положительных показателей. 256. Отрицательные целые показатели. 257. Действия над степенями с отрицательными показателями.

Глава II. Дробные показатели 275
258. В каком смысле употребляется дробный показатель. 259. Основное свойство дробного показателя. 260. Действия над степенями с дробными показателями. 261. Примеры.

Глава III. Некоторые свойства степеней с рациональными показателями (§ 262) 277

Глава IV. Понятие об иррациональном показателе (§ 263) 282

Глава V. Показательная функция 283
264. Определение. 265. График показательной функции. 266. Свойства показательной функции.

ОТДЕЛ ДВЕНАДЦАТЫЙ.

ЛОГАРИФМЫ.

Глава I. Общие свойства логарифмов 288
267. Два действия, обратные возвышению в степень. 268. Определение логарифма. 269. Логарифмическая функция и ее график. 270. Свойства логарифмической функции. 271. Понятие о значении логарифмических таблиц. 272. Нахождение логарифма произведения, частного, степени и корня. 273. Логарифмирование алгебраического выражения. 274. Замечания.

Глава II. Свойства десятичных логарифмов 297
275. Шесть свойств десятичных логарифмов. 276. Следствия.

Глава III. Устройство и употребление 4-значных таблиц 302
277. Системы логарифмов. 278. Преобразование отрицательного логарифма. 279. Описание 4-значных таблиц и нахождение по ним логарифма. 280. Замечание. 281. Предел погрешности приближенного логарифма. 282. Найти число по данному логарифму (таблица антилогарифмов). 283. Замечание. 284. Предел погрешности найденного числа. 285. Действия над логарифмами с отрицательными характеристиками. 286. Замена вычитаемых логарифмов слагаемыми. 287. Примеры вычислений.

Глава IV. Показательные и логарифмические уравнения (§ 288) . . 313

Стр.

Глава V. **Сложные проценты, срочные уплаты и срочные взносы** . . 314

289. Основная задача на сложные проценты. 290. Основная задача на срочные уплаты. 291. Основная задача на срочные взносы.

ОТДЕЛ ТРИНАДЦАТЫЙ.

СОЕДИНЕНИЯ И БИНОМ НЬЮТОНА.

Глава I. **Соединения** 319

292. Определение. 293. Размещения. 294. Задачи. 295. Перестановки. 296. Задачи. 297. Сочетания. 298. Задачи. 299. Другой вид формулы сочетаний. 300. Свойство сочетаний.

Глава II. **Бином Ньютона** 325

301. Произведение биномов, отличающихся только вторыми членами. 302. Формула бинома Ньютона. 303. Свойства бинома Ньютона.

Таблицы четырехзначных квадратных корней, логарифмов и антилогарифмов 332

Школьные учебники СССР

SHEBA.SPB.RU/SHKOLA